

С. В. Волков

СЕТИ КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Москва
Горячая линия - Телеком
2004

УДК 621.39
ББК 32.88
В 67

Рецензент: доктор технических наук, профессор *М. Ф. Тюхтин*

Волков С. В.

В 67 Сети кабельного телевидения. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 616 с с.: ил.

ISBN 5-93517-190-2.

Содержит исчерпывающий материал о терминологии, структуре и оборудовании сетей кабельного телевидения и принципах их проектирования. Рассмотрены общие понятия и принципы формирования и передачи сигнала, основные показатели приемных и передающих систем, приведены формулы и поясняющие их примеры расчета различных характеристик кабельных систем. Систематизирована информация об активном и пассивном оборудовании, волоконно-оптических и коаксиальных кабелях, питании, прокладке и защите кабельной сети. Рассмотрены вопросы проектирования различных систем, включая двунаправленные и гибридные коаксиально-оптические. Приведена информация по использованию сетей кабельного телевидения как среды для передачи дополнительной информации, не относящейся к телевидению.

Для специалистов, связанных с проектированием систем кабельного телевидения, будет полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ББК 32.88

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru
e-mail: radios_hl@mtu-net.ru

Справочное издание

Волков Сергей Викторович

СЕТИ КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Компьютерная верстка Ю. Н. Рыськова
Корректор Т. Н. Иванова
Обложка художника В. Г. Степанова

ЛР № 071825 от 16 марта 1999 г.
Подписано в печать 06.05.04. Формат 70x100/16.
Усл. печ. л. 55. Тираж 3000 экз. Изд. № 190.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО ПФ «Полиграфист»,
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.
Тел.: (8172) 72-55-31, 72-60-72.

ISBN 5-93517-190-2

Волков С. В., 2004

Оформление издательства
«Горячая линия–Телеком», 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Глава 1. Принципы построения систем кабельного телевидения.....	7
1.1. Развитие телевизионных кабельных систем.....	7
1.2. Определение и классификация кабельных систем.....	13
1.3. Структура кабельных систем.....	21
1.4. Комплекс оборудования кабельных сетей.....	27
1.5. Принципы проектирования кабельных систем.....	31
1.6. Экономические аспекты построения кабельных систем.....	41
1.7. Правовые аспекты построения кабельных систем.....	43
Глава 2. Единицы измерения.....	46
2.1. Параметры электромагнитного сигнала.....	46
2.2. Абсолютные единицы измерения амплитуды сигнала.....	50
2.3. Децибел – единица измерения отношений.....	51
2.4. Относительные единицы измерения уровней.....	54
2.5. Относительный уровень по мощности.....	56
2.6. Относительный уровень по напряжению.....	57
2.7. Единицы измерения уровня оптического сигнала.....	58
2.8. Использование относительных единиц в расчетах уровней сигнала.....	61
Глава 3. Формирование сигнала.....	67
3.1. Физические основы телевидения.....	67
3.2. Методы модуляции сигнала.....	69
3.3. Методы мультиплексирования сигналов.....	71
3.4. Аналоговое телевидение.....	74
3.5. Цифровое телевидение.....	78
3.6. Качество передачи.....	86
3.7. Распределение частот телевизионного вещания.....	91
Глава 4. Частотная характеристика.....	103
4.1. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики.....	103
4.2. Амплитудно-частотная характеристика элементов кабельной системы.....	105
4.3. Выравнивание АЧХ на выходе усилительного участка.....	109
4.4. Предкоррекция АЧХ на входе усилительного участка.....	115
Глава 5. Шумы в кабельных системах.....	119
5.1. Природа шума.....	119
5.2. Показатели шума S/N и C/N.....	121
5.3. Шум усилителя.....	124
5.4. Расчет шума каскада усилителей.....	128
5.5. Отношение C/N и выравнивание амплитуд.....	134
5.6. Влияние шума на качество передачи.....	135
Глава 6. Искажения в кабельных системах.....	142
6.1. Искажение как свойство системы.....	142
6.2. Линейные искажения.....	144
6.3. Нелинейные искажения.....	147
6.4. Показатели CTB, CSO, CXM усилителя.....	155
6.5. Расчет нелинейных искажений в каскаде усилителей.....	161
6.6. Интермодуляция и выравнивание амплитуд.....	166
Глава 7. Пассивное оборудование.....	169
7.1. Требования к пассивному оборудованию кабельных систем.....	169
7.2. Пассивные приборы коаксиальных систем.....	171
7.3. Компоненты оптического оборудования.....	179

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты	185
8.1. Структура коаксиального кабеля.....	185
8.2. Типы коаксиальных кабелей.....	189
8.3. Электрические характеристики коаксиального кабеля.....	193
8.4. Возникновение отражений.....	201
8.5. Отражения во внутренней структуре кабеля.....	204
8.6. Отражения в коаксиальной системе передачи.....	206
Глава 9. Волоконно-оптические кабели	216
9.1. Передача света по оптическому волокну.....	216
9.2. Режимы распространения (моды волокна).....	221
9.3. Искажения в оптическом волокне.....	226
9.4. Типы и характеристики оптических волокон.....	231
9.5. Структура волоконно-оптического кабеля.....	237
9.6. Соединение оптических волокон.....	241
9.7. Защита оптического волокна.....	247
Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем	251
10.1. Назначение и классификация усилителей.....	251
10.2. Структурные схемы усилительных устройств.....	253
10.3. Спецификация усилителя.....	260
10.4. Выходная ступень усилительного устройства.....	270
Глава 11. Активное оборудование оптических систем	274
11.1. Особенности оптической системы передачи.....	274
11.2. Характеристики оптического оборудования.....	278
11.3. Шумы и искажения в оптических системах.....	282
11.4. Оптический передатчик.....	285
11.5. Оптический приемник.....	289
Глава 12. Головная станция	297
12.1. Классификация головных станций.....	297
12.2. Прием спутниковых программ.....	300
12.3. Структура и оборудование головных станций.....	305
12.4. Технические параметры головной станции.....	320
12.5. Защита оборудования головной станции.....	328
Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи	330
13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи.....	330
13.2. Расчет уровней сигналов в каскаде усилителей.....	337
13.3. Оптимальное усиление усилителя.....	344
13.4. Расчет уровней сигналов в абонентской точке.....	351
Глава 14. Автоматическая регулировка усиления	356
14.1. Зависимость потерь в кабеле от температуры.....	356
14.2. Принцип действия автоматической регулировки.....	359
14.3. Настройка АРУ.....	361
14.4. Использование АРУ в подвесных сетях.....	367
14.5. Использование АРУ в подземных сетях.....	370
14.6. Системы с высокой степенью авторегулировки.....	372
Глава 15. Проектирование усилительного участка	377
15.1. Использование делителей и ответвителей.....	377
15.2. Методика проектирования.....	382
15.3. Использование промежуточного эквалайзера.....	389
15.4. Расчет нагрузки усилительного участка.....	390
15.5. Учет длины ответвлений.....	397
15.6. Использование делителя в качестве ответвителя.....	399
15.7. Добавление нагрузки на участок.....	401
15.8. Участок с резервированием.....	404
15.9. Участок с "обратной связью".....	407
15.10. Примеры проектирования участков.....	409

Глава 16. Проектирование распределительной сети	415
16.1. Методика транк-фидер	415
16.2. Проектирование сети большого масштаба	419
16.3. Расчет показателей транковой подсистемы	422
16.4. Расчеты показателей фидерной подсистемы	423
16.5. Комбинирование транковой и фидерной подсистем	425
16.6. Проектирование сети малого масштаба	427
16.7. Распределительная сеть на основе одного кабеля	429
16.8. Сравнение методик по техническим показателям	433
16.9. Комбинированная распределительная сеть	435
16.10. Расширение кабельной структуры	437
16.11. Оценка необходимого количества усилителей	439
16.12. Оценка стоимости кабельной структуры	441
Глава 17. Проектирование транспортной сети	447
17.1. Структура и функции транспортного уровня	447
17.2. Волоконно-оптическая транспортная линия	452
17.3. Цифровые технологии передачи	455
17.4. Радиорелейная транспортная линия	465
17.5. Волоконно-оптическая магистраль	471
Глава 18. Гибридные системы передачи	477
18.1. Структура гибридной системы передачи	477
18.2. Проектирование гибридной системы передачи	482
18.3. Расчет оптической части	485
18.4. Расчет коаксиальной части	490
18.5. Интерактивные системы передачи	493
18.6. Особенности проектирования обратного канала	497
Глава 19. Абонентское оборудование	507
19.1. Стандартное оборудование абонентской точки	507
19.2. Контроль доступа абонентов в сеть	513
19.3. Система адресного контроля	515
19.4. Системы скремблирования	520
Глава 20. Передача данных по кабельной сети	530
20.1. Связь между герцами, бодами и битами в секунду	531
20.2. Сети передачи данных	536
20.3. Методы абонентского доступа	541
20.4. Особенности использования сетей КТВ для передачи данных	545
20.5. Система доступа на базе кабельных модемов	547
20.6. Стандарты DOCSIS и DVB/DAVIC	554
20.7. Проблемы и достоинства кабельных модемов	557
20.8. Требования к кабельной сети	560
Глава 21. Питание кабельной сети	564
21.1. Требования к системе питания	564
21.2. Источники питания активных устройств	568
21.3. Падение напряжения в кабельной сети	572
21.4. Расположение источников питания в системе	577
Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети	584
22.1. Подвесная прокладка кабеля	584
22.2. Прокладка кабеля в грунте	587
22.3. Электрическая защита кабельной сети	590
22.4. Механическая защита кабельной сети	595
Список литературы	603
Указатель аббревиатур	605
Предметный указатель	609

ПРЕДИСЛОВИЕ

Популярность систем кабельного телевидения в Европе и особенно в США сейчас очень велика. Это и понятно, так как на западе кабельные сети начали активно строиться еще в 1980-х годах и пережили свой бум в начале 1990-х. В России же пока индустрия кабельных сетей только развивается. Долгое время при построении сетей кабельного телевидения использовались либо устаревшие советские стандарты, либо западные, и только недавно был принят новый российский ГОСТ Р52023-2003. Сведения по этой тематике очень разрознены. Основными источниками являются периодические издания, публикации в Интернет и документация к оборудованию, главным образом западного производства. В то же время единой теоретической основы для построения сетей кабельного телевидения нет. Книги с достаточно полным изложением материала по сетям кабельного телевидения в России до сих пор не издавались. В этой работе сделана попытка обсудить широкий круг вопросов, касающихся создания сетей кабельного телевидения. В ней содержится много полезных и необходимых сведений, как теоретического, так и практического характера. Книга призвана стать пособием для учащихся и технических специалистов, связанных с проектированием систем кабельного телевидения. В понятной и доступной форме представлен исчерпывающий материал, охватывающий все аспекты современных сетей, начиная с самых азов. Читатель получит представление о терминологии, структуре и оборудовании сетей кабельного телевидения, принципах их проектирования.

Первые три главы являются вводными и в них обсуждаются общие понятия и принципы формирования и передачи сигнала. В гл. 4 – 6 рассматриваются основные показатели системы. Активному и пассивному оборудованию, а также различным типам кабелей посвящены гл. 7 – 12. В книге рассматриваются оба типа кабелей – коаксиальный и волоконно-оптический. Системы передачи на основе коаксиального кабеля по-прежнему очень широко распространены, но создание современных сетей уже не мыслится без использования оптики, поэтому оптическим системам в книге уделено должное внимание. В последующих главах обсуждаются вопросы проектирования различных систем, включая двунаправленные и гибридные коаксиально-оптические. Рассматривается также возможность использования сетей кабельного телевидения как среды для передачи дополнительной информации, не относящейся к телевидению. В последних двух главах говорится о питании, прокладке и защите кабельной сети. Каждая глава книги снабжена предварительным обзором тех сведений, которые в ней содержатся. В окончании каждой главы имеются выводы, в которых кратко подытоживается ее содержание. В тех местах, где это необходимо, приведены формулы и поясняющие их примеры расчета различных характеристик кабельной системы.

Благодарю за помощь в создании этой книги Екатерину Геннадьевну Андрееву, Сергея Александровича Беликова, Евгения Константиновича Корытко, Михаила Владимировича Симонова, Павла Алексеевича Пяткина и моих родителей – Тамару Михайловну Волкову и Виктора Михайловича Волкова.

Глава 1

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

До недавнего времени самым распространенным, а иногда и единственным, средством доставки телевизионных сигналов в частные квартиры и дома было эфирное телевизионное вещание. Для этого использовались и используются по настоящее время открытые метровые и дециметровые радиоканалы, организуемые передающим и приемным оборудованием в свободном пространстве. Частоты вещания распределены в соответствии с частотным планом, установленным государственными органами контроля радиосвязи. Радиочастотный спектр эфирного телевизионного вещания, таким образом, был предоставлен для свободного общественного использования. Примерно с конца 50-х годов XX века постепенно стало развиваться другое направление в области телевизионного вещания – кабельное телевидение. В системах кабельного телевидения для передачи сигнала стала использоваться закрытая среда распространения электромагнитных волн. Развитие этих двух типов систем шло параллельно, но соотношение темпов и масштабов их развития традиционно было в пользу эфирных систем. Однако в течение последних десяти лет системы кабельного телевидения приобретают все большую популярность, чему есть множество объективных причин. Системы кабельного телевидения (далее также будем называть их системами КТВ), являясь средством коллективного распределения телевизионного сигнала, свободны от многих недостатков эфирных систем. Среди первых достоинств кабельных систем можно назвать высокое качество сигнала, высокую защищенность передачи и новые дополнительные возможности, связанные с их эксплуатацией. Определяемые в этой главе понятия являются ключевыми в понимании принципов построения систем КТВ и необходимы для изучения материала всех последующих глав.

1.1. Развитие телевизионных кабельных систем

Считается, что системы кабельного телевидения появились в начале 1950-х годов в США. Тогда они начали строиться как коммерческая альтернатива телевизионному вещанию по открытому радиоканалу в тех районах, где эфирный прием был затруднен. Постепенно системы кабельного телевидения продвигались и в те районы, в которых не было проблем с эфирным приемом, конкурируя с общедоступными и бесплатными эфирными системами. Разумеется, для этого оператору кабельной системы приходилось заинтересовывать абонентов, предлагая им расширенный и улучшенный сервис. Благодаря этому со временем кабельные системы заняли свое прочное место в средних и крупных городах. И хотя главным направлением в телевизионном вещании долгое время оставалось эфирное ТВ, спрос на кабельные системы не ослабевал и они продолжали развиваться.

Немного истории и статистики. Традиционно США считались лидером в мировой индустрии кабельного телевидения. Для примера можно привести тот факт, что уже к 1973 году в США насчитывалось более 2000 систем кабельного телевидения, обслуживающих в совокупности более 2,5 миллионов абонентов. К концу 1999 года кабельным телевидением в США было охвачено около 65 % частных домов и квартир. В Европе популярность сетей КТВ не была так велика, и это соотношение сохраняется до сих пор. В среднем охват частного сектора в Европе составляет около 30 %. Однако, в некоторых европейских странах кабельные системы распространены очень широко. Например, в странах Бенилюкса охват кабельным телевидением достигает 90%. В России системы кабельного телевидения также развивались, хотя и гораздо менее быстрыми темпами. Только в 1979 году в Советском Союзе впервые был принят ряд законодательных решений относительно создания кабельных систем коллективного приема. Впоследствии, к 1989 году в Москве было построено несколько десятков систем кабельного телевидения разного масштаба с общим числом абонентов около 80 тысяч.

Первые отечественные кабельные системы представляли собой распределительную структуру с коллективной антенной, установленной на высокой мачте или крыше здания. Принимаемый этой антенной эфирный сигнал разводился с помощью коаксиальных кабельных ответвлений ограниченному числу потребителей. Системы этого типа, обычно называемые "антенна на подъезд", были пассивными, т.е. без усиления сигнала, поступающего от антенны, и позволяли лишь несколько улучшить качество приема за счет усложнения конструкции общей антенны. Они работали в узкой полосе диапазона МВ (менее 200 МГц) без преобразования (конвертирования) частот телеканалов, т.е. частоты передаваемых каналов в них совпадали с частотами эфирного вещания. Число передаваемых телеканалов было мало, но, главное, эти системы могли обслуживать лишь очень небольшое количество абонентов (не более 15). Характеристики разветвителей и кабелей были далеки до совершенства. Даже при высоком уровне принимаемого сигнала эти системы коллективного приема имели хорошие качественные показатели только при небольшой протяженности системы. Затем появились кабельные системы второго типа, названные системами коллективного приема телепрограмм (СКПТ). Специально для них были разработаны различные активные компоненты, широкополосные усилители, каналные или диапазонные фильтры. Эти системы имели более сложную и разветвленную распределительную структуру и уже могли обслуживать несколько сотен абонентов. Однако, эти системы тоже были узкополосными, работающими в диапазоне МВ без конвертирования частот телеканалов. Зачастую это значительно ухудшало качество приема.

В 1980-х годах начали создаваться так называемые крупные системы коллективного приема телепрограмм (КСКПТ), объединяющие несколько СКПТ в масштабе целого района или даже небольшого города. Количество абонентов в такой системе могло достигать нескольких тысяч. Системы КСКПТ имели, по крайней мере, две существенных отличительных особенности. Прежде всего, как особый элемент системы был выделен комплекс головного передающего оборудования – головная станция. Во-вторых, все каналы в этой системе стали передаваться с конвертированием частот, что сильно снизило влияние эфирных передатчиков на качество изображения у абонентов кабельной сети. Соответственно, в КСКПТ стали различать каналы приема и каналы распределения.

Системы КСКПТ перестали быть только ретрансляционными, поскольку в них появилась возможность подачи собственных сигналов со студийных видеомагнитофонов и телекамер. Недостатком этих систем по-прежнему оставалась их узкополосность. Разработанные для кабельных сетей советские стандарты ГОСТ 11216-83 и ГОСТ 28324-89 регламентировали использование для передачи сигналов телевидения полосы частот шириной около 300 МГц, что сильно осложняло попытки увеличения количества передаваемых каналов, поскольку возможность размещения каналов в диапазоне МВ была практически исчерпана к концу 1980-х годов.

В конце 1980-х – начале 1990-х путь развития кабельной отрасли в России был определен особенностями национальной экономики. На фоне повышенного спроса населения на видео продукцию произошел всплеск активности кабельщиков. Кабельные сети тогда стали возникать спонтанно как отдельные малые сети масштаба отдельного многоэтажного дома или микрорайона. Владельцами этих разрозненных сетей разного масштаба, разного канального наполнения и качества передачи были небольшие компании или просто частные лица. Зачастую сотрудники этих компаний не были специалистами в области телевизионного вещания, а приходили из смежных технических специальностей. В то же время появилось множество новых бесплатных эфирных каналов, государство стало заниматься правовым регулированием кабельных операторов и традиционный бизнес большинства кабельщиков приносил все меньше доходов. Поэтому операторы КТВ начали переориентировать и укрупнять свои сети, вводить в них спутниковые каналы. Появилась концепция крупных систем кабельного телевидения, рассчитанных на подключение десятков тысяч абонентов, способных передавать сигналы десятков телеканалов и, возможно, других служб, что явилось следующим этапом развития телевизионных кабельных систем.

Сегодняшний виток эволюции систем КТВ связан уже с международными проектами и новыми концепциями в этой области. К концу 1990-х годов в связи с изменениями в экономике крупные отечественные и западные компании стали делать инвестиции в российскую кабельную индустрию. Выросло множество крупных кабельных компаний во многих городах страны. Этот этап был отмечен приходом профессионалов в кабельный бизнес, причем, как в технической, так и в экономической области. Бурное развитие информационных технологий потребовало значительного пересмотра концепции построения кабельных систем передачи, назрела необходимость создания принципиально других систем. Основными отличиями систем КТВ нового поколения является их широкополосность, многофункциональность и интерактивность. Исследовательские работы по этим направлениям велись во всем мире. В результате были разработаны такие стандарты как EN 50083, DOCSIS, DVB/DAVIC. Был принят и новый российский стандарт ГОСТ Р52023-2003. Интеграция различных служб в сети КТВ обеспечивает ее многофункциональность. В новых системах КТВ телевизионный сигнал становится лишь одним из видов информации, помимо него система широко используется для передачи сигналов других информационных служб. В принятых документах был официально утвержден переход от узкополосных кабельных систем к широкополосным с полосой передачи 5–860 МГц (по ГОСТ Р52023-2003 с полосой 5–1000 МГц). В перспективе ожидается дальнейшее увеличение верхней частоты. На основе принятых стандартов был создан широкий спектр оборудования нового поколения для построения совре-

менных систем КТВ. Параллельно совершенствовались и методики построения сетей КТВ, подходы к их проектированию, принципы их адаптации к техническим условиям конкретного проекта.

Говоря о стратегии развития сетей кабельного телевидения в России, нужно отметить явное оживление в этой отрасли за последние пять лет. Правда, аналитики, члены российской ассоциации кабельного телевидения (АКТР), насчитывающей более 80 членов, признают, что "к сожалению, отечественные достижения в области техники КТВ – в большой степени результат деятельности энтузиастов". Моральное старение существующих сетей в сочетании с отсталостью отечественного производства в сфере высоких технологий определяют нынешнюю ситуацию. "Немногочисленные существующие предприятия не могут удовлетворить все потребности рынка, а для роста производства нужны серьезные инвестиции, привлечение которых прямо зависит от государственной политики в области КТВ". В то же время многие эксперты считают, что в ближайшее время можно ожидать настоящего бума в развитии широкополосных мультисервисных кабельных сетей. Причиной этого является присоединение России к хартии глобального информационного сообщества и связанные с этим международные проекты. Вступив в эту организацию, Россия тем самым взяла обязательство построить весьма большую часть Глобальной Информационной Инфраструктуры (ГИИ), в основе проекта которой лежит создание широкополосных интегральных сетей в крупных городах. Применяемые при этом технологии настолько дорогостоящи, что требуют огромных инвестиций, а это означает обеспеченное будущее для всей кабельной отрасли. Россия принимает участие в европейском проекте IBCoBN (Integrated Broadband Communications on Broadcast Networks), входящем в программу ACTS (Advanced Communication Technologies and Services) Европейской Комиссии (ЕС). На экспериментальных сетях испытывается новейшее оборудование, создаются программные комплексы и математические модели технико-экономического анализа интерактивных сетей КТВ (OPTIMUM, TERRA). Материалы по этому проекту можно найти в журнале "Телемультимедиа" №2(6) 2001г и на сайте журнала "Телеспутник".

На крупнейших в стране предприятиях КТВ "Санкт-Петербургское кабельное телевидение" и "Комкор" (Москва) в 2001 году организованы экспериментальные участки для исследования возможностей предоставления всего комплекса услуг в сетях КТВ во взаимодействии с различными наземными и спутниковыми средствами телевизионного вещания. Эти сети реализуют и эксплуатируют самые современные технологии передачи. Например, гибридная мультисервисная сеть КТВ Комкор создана на основе волоконно-оптической транспортной системы и двунаправленной гибридной волоконно-коаксиальной распределительной сети общей емкостью более 100 тысяч квартир. Транспортный уровень построен на цифровых и аналоговых волоконно-оптических линиях связи. К узлам распределительной сети подходит высокопроизводительная транспортная ATM сеть, которая позволяет предоставлять услуги высокоскоростного доступа в Интернет, передачи данных с помощью технологии кабельных модемов. В распределительной сети проложены 11 кольцевых оптических магистралей, содержащих в общем 198 оптических приемопередатчиков, к которым подключены коаксиальные сегменты. Каждый приемопередатчик обслуживает около пятисот квартир, т.е. приблизительно по одному волокну обслуживается один дом. Такие крупные и технологически развитые сети как Санкт-Петербургское КТВ

и Комкор делают ставку на российского производителя, что позволило уже создать более десяти тысяч рабочих мест.

О развитии сетей КТВ в крупных городах свидетельствуют данные статистики. По данным Управления Госсвязьнадзора по Петербургу на 2000 год было выдано 23 лицензии на предоставление услуг КТВ в городе и еще 23 – в Ленобласти. По данным маркетингового исследования "Создание опытной зоны цифрового аудио и телевидения", которое проводило ЗАО "Северо-Западная Медиа группа" в мае 2000 года, годовой объем рынка услуг сетей КТВ в Петербурге составлял около 7 миллионов долл. В 2002 году на петербургском рынке утвердилось множество операторов, работающие как в масштабах районов, так и всего города. Среди них Теликс, Катрина, ПАКТ, Каравелла, Аврора и крупнейший оператор – ОАО ТКТ, который получил во владение главную городскую сеть КТВ (сеть вещала почти на 1,3 млн. квартир, в том числе услугами кабельного телевидения пользовались около 450 тыс. квартир). В течение ближайших 5 лет ТКТ планирует сделать сеть современной и интерактивной, покрыв ею весь Петербург, и инвестировать в ее развитие 40 – 50 млн. долл. На базе построенных оптоволоконных колец подключается около 8 тыс. квартир в месяц, параллельно проводится модернизируя существующей сети. По оценкам руководства компании модернизация сети стоит около 20 долл. на абонента. В проекте планируется использовать головные станции отечественного производства СГ-900 емкостью на 50 – 80 тыс. квартир, стоимость которых составляет около 3500 долл. Практически все кабельные операторы работают в сотрудничестве с крупными Интернет-провайдерами. В настоящее время в Петербурге действует около 50 сетей КТВ. Помимо ТКТ другие сети КТВ в Петербурге в общей сложности обслуживают по разным оценкам от 70 до 90 тыс. квартир. Средний размер месячной абонентской платы составляет 60 руб.

Согласно данным органов Государственного надзора за связью и информатизацией, которые были опубликованы в журнале "Электросвязь" № 9 2002 и на сайте АКТР, к 2002 году в РФ было выдано около 700 лицензий на трансляцию ТВ программ по сети КТВ, построены современные кабельные сети общей емкостью более 20 миллионов абонентов, к которым подключилось около 12 миллионов абонентов. Примерно 250 тысяч абонентов были подключены к мультисервисным интерактивным сетям и могут пользоваться дополнительными услугами. Число абонентов кабельного Интернета составляло 13 тысяч, а сейчас их около 20 тысяч при том, что средняя абонентская плата за доступ в Интернет непомерно высока – около 30 долл. По данным Лардо-Телеком, в 2003 году на IV семинаре кабельных операторов Урала и Западной Сибири проводился опрос среди 42 операторов КТВ из Свердловской, Челябинской, Тюменской, Пермской, Новосибирской, Кемеровской и Оренбургской областей. В результате опроса было выяснено, что число абонентов средней сети составляет 17 тысяч, стоимость подключения – от 600 до 1500 рублей. Российская абонентская аудитория очень неоднородна. Большая ее часть (50...60 %) – это абоненты систем коллективного приема телепрограмм, получающие стандартный набор из 5...6 эфирных телеканалов (ОРТ, РТР, ТВЦ, НТВ, "Культура" и, возможно, региональный или муниципальный канал). Примерно 30...40% составляют абоненты более или менее модернизированных крупных и средних систем коллективного приема, принимающие 15...20 каналов, в число которых входят в основном эфирные и спутниковые российские каналы, но иногда и зарубежные спутниковые каналы. По-настоящему современных интерактивных

сетей КТВ сейчас в России не более 10%. Рост прибыли российских кабельных компаний пока отстает от европейских. По данным того же АКТР все вместе взятые операторы КТВ получают доход порядка 10 миллионов долл. в месяц, т.е. 120 миллионов в год, тогда как, например, в Польше доход составляет около 900 миллионов. Перспективы дальнейшего роста прямо связаны с введением новых интерактивных услуг и переходом на цифровую передачу. Это расширит возможности операторов и клиентов сети и, кроме того, упорядочит финансовые взаимоотношения между ними.

Следующим этапом станет переход на цифровое телевизионное вещание. Первые эксперименты в этом направлении начались в Нижнем Новгороде еще в 2000 году. В Санкт-Петербурге с 2001 года осуществляется опытная эксплуатация цифрового канала. Выгода должна быть налицо в первую очередь для государственных органов. Частотный ресурс ограничен, а если, например, 15 телеканалов Останкино передавать в цифровом виде по четырем каналам, то освобожденные частоты можно будет предоставить на конкурсной основе новым телеканалам или другим технологиям. Переход на цифровые технологии означает также значительную экономию электроэнергии (почти в 10 раз), что для такой огромной страны как Россия весьма существенно. Срок перехода к полномасштабному цифровому вещанию зависит от темпов работ по созданию экономического оборудования, как для абонента, так и для оператора сети. Необходим недорогой кодер (платить сегодня 40 тысяч долл. за кодер может далеко не каждая вещательная компания), а также гибридный телевизор, способный работать и с аналоговым, и с цифровым сигналом (разработки ведутся в МНИТИ). Что касается цифровых телевизоров, то возможно лет через пять стоимость этих изделий окажется вполне приемлемой для среднего покупателя.

Прогресс в индустрии систем КТВ за последнее десятилетие стал возможен благодаря развитию технологий передачи и обработки сигнала. Прежде всего, это касается перехода на волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Потенциальные возможности ВОЛС в смысле расширения полосы передачи более чем на порядок превосходят коаксиальные системы даже при использовании модулированного излучения всего на одной длине волны. Если же использовать спектральное уплотнение, емкость системы передачи возрастает еще на порядок. Другим ценным преимуществом ВОЛС является независимость двух световых сигналов, распространяющихся в одном волокне навстречу друг другу на одной длине волны или в одном направлении на разных длинах волн. Перекрестных влияний и искажений сигналов при этом не происходит. Это позволяет создать двунаправленную систему с передачей множества сигналов абоненту на основе всего одного волокна на одной длине волны без устройств смешивания сигналов.

Волоконно-оптические линии связи совершенно нечувствительны и к внешним электромагнитным помехам, поскольку они работают в другой области электромагнитного спектра. Кроме того, затухание светового сигнала в ВОЛС очень мало, поэтому на базе ВОЛС можно построить чисто пассивную систему без электрооптических преобразователей и усилителей в линии передачи. Для создания распределительной структуры можно использовать пассивные оптические ответвители, позволяющие ответвлять определенную долю оптической мощности или вставлять оптический сигнал в общий поток. За счет названных достоинств ВОЛС несоизмеримо повышается качество передачи и надежность системы в целом.

Важнейшим шагом в развитии телевизионных кабельных сетей явилось их оснащение обратным направлением передачи от абонента на головную станцию или так называемым обратным каналом. Первоначально обратное направление использовалось и в некоторых системах КСКПТ для передачи внутрисистемных сигналов в целях усовершенствования системы управления сетью. Но позже оказалось, что технология обратного канала как нельзя более подходит для создания интерактивной среды, в которой каждый абонент мог бы передавать свою информацию оператору сети, например, сообщая ему о своем желании подписаться на тот или иной канал или делая электронные платежи или заказывая те программы, которые ему интересны.

Переход на цифровые технологии в кабельных сетях является закономерным этапом их эволюции и предоставляет еще большие возможности. Эти технологии получают все более широкое применение благодаря разработке новых быстродействующих процессоров цифровой обработки сигнала. Внедрение в системы КТВ компьютерных технологий, автоматизация системы учета и ведения личных счетов абонентов (биллинга) и системы управления сетью КТВ поднимает кабельную индустрию на качественно новый уровень. Он связан с превращением сетей КТВ из чисто телевизионных в интегральные системы с предоставлением абоненту телевизионных программ, доступа в компьютерные сети, цифровой телефонии, электронной почты, видео по запросу и многих других услуг.

1.2. Определение и классификация кабельных систем

Понятие “кабельное телевидение” (КТВ) является довольно общим и часто не совсем корректно используется для обозначения любых способов организации телевизионной передачи по кабелю. Правильнее было бы сказать, что системы КТВ явились логическим продолжением развития систем коллективного приема телепрограмм (СКПТ) или, как их принято определять в зарубежной литературе, Community Antenna Television service (CATV). Эти понятия часто используются как синонимы, поэтому для простоты будем пользоваться этим уже привычным термином.

В настоящее время классификация систем кабельного телевидения с использованием терминов СКПТ и КСКПТ устарела. Согласно действующему ГОСТ Р52023-2003 любую систему кабельного телевидения следует называть СКТ, а для различия систем по масштабу введены классы. Далее в книге будут встречаться обе аббревиатуры (система КТВ и СКТ) – означают они одно и то же. Различают 4 класса систем кабельного телевидения в зависимости от масштаба кабельной распределительной сети. Местной сети соответствует система класса СКТ-1, районной сети соответствует система класса СКТ-2, городской сети соответствует система класса СКТ-3, региональной сети соответствует система класса СКТ-4. В табл. 1.1 приведена классификация систем кабельного телевидения по масштабу и выполняемым функциям. Если проводить параллель со старой классификацией, то СКТ-1 приблизительно соответствует СКПТ, СКТ-2 – КСКПТ, СКТ-3 – СКТ, а СКТ-4 – КСКТ (крупной СКТ). Чтобы оценить масштабы систем разных классов, можно примерно оценить количество абонентов каждой из них: для СКТ-1 – менее 1000, для СКТ-2 – менее 50000, для СКТ-3 – менее 100000, для СКТ-4 – более 100000. Заметим, что эта классификация условна, а состав оборудования может меняться в зависимости от условий эксплуатации.

Система кабельного телевидения (СКТ) представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для формирования, обработки и передачи телевизионных сигналов в закрытой среде, их распределения с помощью распределительных кабельных структур и приема с помощью индивидуальных абонентских устройств. СКТ обеспечивает различные услуги связи (телевидение, радиовещание, другие сообщения). Возможность вещания по кабелю является очень привлекательной, по крайней мере, с двух точек зрения.

Таблица 1.1

Классификация систем КТВ согласно ГОСТ Р52023-2003

Класс	Область применения	Виды сигналов на входе КРС	Состав оборудования КРС	Условия работы
СКТ-1	Одно или несколько близстоящих зданий	Радиосигналы наземного телевидения и радиовещания; сигналы спутникового телевидения и радиовещания; радиосигналы системы MMDS; радиосигналы кабельных модемов.	Местная КРС (локальная) в составе: – местная ГС; – одна или несколько домовых сетей.	Однонаправленная или двунаправленная передача радиосигналов
СКТ-2	Район	Радиосигналы наземного телевидения и радиовещания; сигналы спутникового телевидения и радиовещания; радиосигналы системы MMDS; радиосигналы кабельных модемов; сигналы местных студий	Районная КРС в составе: – местная ГС; – гибридная или коаксиальная магистральная сеть; – домовые сети	Двунаправленная передача радиосигналов. Предоставляемые услуги определяются оборудованием системы
СКТ-3	Город (округ города)	Оптические сигналы волоконно-оптической транспортной сети; радиосигналы наземного телевидения и радиовещания; сигналы спутникового телевидения и радиовещания; радиосигналы системы MMDS; радиосигналы кабельных модемов; сигналы местных студий	Городская КРС в составе: – узловая ГС; – гибридная магистральная сеть; – домовые сети	Двунаправленная передача радиосигналов. Предоставляемые услуги определяются оборудованием системы

1.2. Определение и классификация кабельных систем

Класс	Область применения	Виды сигналов на входе КРС	Состав оборудования КРС	Условия работы
СКТ-4	Регион (город)	Сигналы городских (центральных) студий; оптические сигналы волоконно-оптических соединительных линий; радиосигналы наземного телевидения и радиовещания; сигналы спутникового телевидения и радиовещания; радиосигналы системы MMDS; радиосигналы кабельных модемов	Региональная КРС в составе: – центральная ГС; – волоконно-оптическая транспортная сеть; – узловые ГС; – гибридные магистральные сети; – домовые сети	Передача радиосигналов по транспортной сети на узловые головные станции системы СКТ-3 и на оптические узлы систем. Предоставление широкого набора услуг
Примечание: Классификация систем кабельного телевидения условна, состав оборудования может быть изменен в процессе эксплуатации.				

Во-первых, особенностями эфирной передачи сигнала в крупных городах с плотной застройкой является появление эффекта стоячих волн между стенами зданий вследствие интерференции прямых и отраженных волн, а также образование зон радиотени или “колодцев” за высотными зданиями. В результате появляются зоны неуверенного эфирного приема или приема с искажениями в виде размытых контуров и повторных изображений, сдвинутых друг относительно друга по горизонтали.

Системы КТВ лишены этого недостатка. Во-вторых, кабель, являющийся закрытой средой передачи, более подходит для создания частных систем коммерческой эксплуатации или систем передачи информации ограниченному кругу потребителей, имеющих права доступа. Следовательно, системы КТВ в сравнении с эфирными системами имеют два очевидных преимущества – надежность и безопасность передачи.

Ниже дано несколько более точных определений в соответствии с новым ГОСТ тех понятий, которые уже были введены выше. Затем они будут рассмотрены более подробно.

Кабельная распределительная сеть (КРС) или просто распределительная сеть – совокупность технических средств и устройств, обеспечивающих передачу радиосигналов в системе кабельного телевидения. Входом распределительной сети является вход головной станции, а выходом – выход абонентской розетки. Основными элементами КРС являются головная станция и линейный тракт.

Линейный тракт (линейная сеть) – звено кабельной распределительной сети между выходом головной станции и абонентской розеткой. Линейный тракт может включать систему транспортных линий передачи (транспортную сеть), магистральную часть (магистральные распределительные сети), домовую часть (домовые распределительные сети) и абонентские сети.

Транспортная сеть – совокупность технических средств, устройств и кабельных линий линейной сети между выходом центральной головной станции и входами узловых головных станций.

Магистральная сеть – совокупность технических средств, устройств и кабельных линий линейной сети между выходом узловой головной станции (местной головной станции) и домовыми вводами.

Домовая сеть – совокупность технических средств, устройств и кабельных линий линейной сети между домовым вводом и выходом абонентской розетки.

Абонентская сеть – совокупность технических средств, устройств и кабельных линий, обслуживающих одного абонента в пределах занимаемой им площади жилого или общественного здания.

Головная станция распределительной сети – совокупность технических средств, обеспечивающих прием, преобразование, усиление, формирование, сложение радиосигналов телевизионного вещания, а также других сигналов электросвязи.

Центральная головная станция – головная станция региональной кабельной распределительной сети, включенная между выходами источников сигналов и входом волоконно-оптической транспортной сети.

Узловая головная станция – головная станция городской кабельной распределительной сети, включенная между выходом транспортной сети (выходами источников сигналов) и входом волоконно-оптической или коаксиальной магистральной сети.

Местная головная станция – головная станция местной (районной) кабельной распределительной сети, включенная между фидерами снижения приемных антенн (выходами источников сигналов) и входом магистральной (домовой) сети.

Оптический узел – совокупность технических средств и устройств, обеспечивающих сопряжение волоконно-оптического и коаксиального участков линейной сети.

Домовый ввод (вход домовой сети) – узел подключения домовой сети к магистральной сети или к местной головной станции. В некоторых случаях эта сервисная точка непосредственно является выходом местной головной станции (СКТ-1).

Магистральное ответвление – элемент магистральной сети между отводом магистрального ответвителя и домовым вводом. Выходом магистрального ответвления является, как правило, домовый ввод.

Абонентская линия (абонентское ответвление) – элемент домовой сети между отводом абонентского ответвителя (выходом абонентского распределителя) и входом абонентской сети (абонентской розетки).

Абонентская розетка – элемент домовой сети, обеспечивающий подключение терминального абонентского оборудования к абонентской сети или абонентской линии.

Кабельный модем – элемент системы кабельного телевидения, обеспечивающий цифровую модуляцию и демодуляцию радиосигнала.

Однонаправленная передача – распределение радиосигналов телевидения и других радиосигналов в кабельной распределительной сети в прямом направлении, т.е. от головной станции к абонентским устройствам.

Двунаправленная передача – распределение радиосигналов телевидения в кабельной распределительной сети в прямом направлении и одновременная

независимая передача других радиосигналов в прямом и обратном направлениях, т.е. от головной станции к абонентским устройствам и от абонентских устройств к головной станции.

Канал приема – радиоканал, в котором осуществляется прием радиосигнала программ телевизионного вещания на головной станции.

Канал распределения – радиоканал, в котором осуществляется односторонняя передача радиосигнала в распределительной сети после конвертирования. Преобразование по частоте радиосигнала основного канала приема в радиосигнал канала распределения обеспечивает каналный конвертор на головной станции.

Пилотное регулирование – способ автоматической стабилизации коэффициента передачи и наклона амплитудно-частотной характеристики в кабельной распределительной сети путем передачи специальных “пилот-сигналов” управления.

Система кабельного телевидения, таким образом, состоит из источника сигнала (головной станции), линейной сети и приемного абонентского оборудования. Главная задача системы КТВ заключается в доставке и распределении сигнала множества телевизионных каналов, поступающих от центральной головной станции по транспортной или(и) магистральной сети, путем подведения кабеля (в основном коаксиального) к абонентским телевизионным розеткам, т.е. непосредственно в дом абонента. Сейчас уже очевидно, что система КТВ, кроме этого, должна выполнять и другие задачи по обслуживанию абонентов. Поэтому вместо того, чтобы говорить о доставке телевизионных сигналов, скажем более широко – сеть КТВ должна предоставлять абонентам информационные услуги. Пространство, охваченное распределительными структурами сети КТВ, называется областью обслуживания. Размер области обслуживания и структура системы внутри области различаются и зависят от конкретных технических и географических условий.

По размеру области обслуживания системы КТВ весьма условно можно разделить на системы небольшого масштаба (небольшой город, поселок, район, что соответствует СКТ-1 и СКТ-2) и крупные системы (большой город или регион, что соответствует СКТ-3 и СКТ-4). Существенно, что при их проектировании используются разные подходы. Основным конечным обслуживаемым прибором в системе КТВ является телевизионный приемник. Модели телевизионных приемников могут значительно различаться по своим техническим характеристикам, поэтому система КТВ должна обеспечить качественный прием телепрограмм любым телевизором.

Распределение радиосигналов в прямом направлении и передача радиосигналов в обратном направлении осуществляется по гибридным или коаксиальным кабельным линиям. Под гибридными линиями понимается сочетание волоконно-оптических линий с коаксиальным кабелем. Источниками сигналов для самой головной станции системы КТВ могут быть спутники телевизионного вещания, вещательные центры эфирного телевидения, собственные источники телесигнала на головной станции (видеомагнитофоны, телекамеры) и другие кабельные или эфирные сети связи. Для СКТ-1 предусматривается передача телевизионных и других радиосигналов электросвязи в прямом или обратном направлении, а для СКТ классов 2,3 и 4 – только двунаправленная передача.

Сформулируем и коротко поясним основные требования к современной теме КТВ. Система КТВ должна удовлетворять следующим требованиям

- широкополосность;
- интерактивность;
- гибридная волоконно-коаксиальная архитектура;
- возможность обслуживания большого числа абонентов;
- возможность перехода на цифровой метод передачи сигнала;
- возможность предоставления дополнительных услуг.

Первое требование означает, что система КТВ должна иметь большую ширину полосы пропускания, достаточную для размещения в ней множества телевизионных каналов (более 50). Для этого все устройства и приборы кабельной системы должны работать во всей отведенной полосе частот, не внося значительных искажений в передаваемые сигналы. Само по себе понятие “широкополосный” не обозначает какой-либо определенной службы и не определяет какой-либо специальной технологии передачи. Это определение применимо и к коаксиальному кабелю, и к оптическому волокну, и ко множеству разнообразных эфирных систем передачи. Понятие широкополосности является относительным. В старом стандарте ГОСТ 28324-89 для передачи сигнала по кабельным сетям отводилась полоса 47 – 300 МГц. При ширине одного канала 8 МГц в такой полосе можно было обеспечить одновременную передачу максимум 28 телеканалов, из которых 12 каналов размещается в метровом диапазоне 48 – 110 МГц и 110 – 230 МГц, 8 каналов в мом спецдиапазоне 110 – 174 МГц (они называются СК1-СК8), и еще 8 каналов в дополнительном спецдиапазоне 230 – 294 МГц (они называются СК11-СК18). Однако следует понимать, что не все частоты из этих 28 можно использовать одновременно из-за ограничений на возможность совместного усиления и передачи. Реальное число каналов на этих частотах примерно в 2 раза меньше. В условиях большой тесноты в эфире и появления множества новых телеканалов, полосы 300 МГц оказалось недостаточно. Поэтому для прямой передачи в современных сетях отводится полоса частот 47 – 1000 МГц. В такой полосе можно передать уже более 80 аналоговых телевизионных каналов.

Интерактивность означает возможность двустороннего взаимодействия по сети КТВ, в том числе, в реальном масштабе времени. Реализуется эта возможность путем выделения полосы частот для обратного направления передачи сигналов, т.е. от абонента на головную станцию. Такая система будет обеспечивать одновременную и независимую передачу сигналов и данных в обоих направлениях, т.е. будет двунаправленной.

Для двунаправленных систем сформировалась своя терминология. Согласно ГОСТ Р52023-2003, полосу частот, в которой сигналы передаются от головной станции к абоненту, называют прямым направлением передачи, а иногда прямым каналом (в зарубежной литературе – downstream, “нисходящий поток”). Полосу частот, в которой сигналы передаются от абонента на головную станцию, называют обратным направлением передачи или обратным каналом (в зарубежной литературе – upstream, “восходящий поток”). Термины “прямой канал” и “обратный канал” не совсем корректны и не стандартизованы, но они часто применяются в обиходе. Сигналы обратного канала передаются в полосе 5 – 30 МГц, а прямого – на частотах выше 47 МГц, хотя в стандарте оговаривается, что расширение полосы обратного канала возможно за счет полосы прямого канала. По ГОСТ 28324-89 обратный канал не был предусмотрен вообще. Обратный канал было решено разместить в низкочастотной области спектра, поскольку, нижняя частота мого диапазона (47 МГц) не менялась и нижележа-

щие частоты оставались незанятыми телевизионным вещанием. Разделение прямого и обратного направлений передачи осуществляется с помощью дуплексных фильтров. Спектр прямого канала разделен на участки так, чтобы выделенные (назначенные) участки спектра могли использоваться для совершенно различных информационных служб, например, частоты выше 600 МГц отведены для передачи цифровых сигналов. При таком подходе в кабельной сети наряду с телевизионными сигналами будет передаваться в интерактивном режиме большой объем цифровых данных различных служб.

Новые требования к качеству и скорости передачи в системах КТВ уже не позволяют строить их, как и ранее, на основе только коаксиального кабеля. Опыт строительства широкополосных интерактивных систем КТВ во всем мире показал, что наиболее эффективным вариантом их структуры на сегодняшний день являются комбинированные или гибридные оптико-коаксиальные структуры HFC (Hibrid Fiber Coaxial), созданные с использованием оптических и коаксиальных кабелей.

Такие структуры дают наилучшее соотношение «цена – качество». В сетях структуры HFC весь транспортный и частично или полностью магистральный участок выполняется на основе оптического волокна, а распределительный участок – на основе коаксиального кабеля. Наблюдается тенденция к отказу от коаксиального кабеля на магистральных участках сети, но в качестве средства распределения пока практически повсеместно (по крайней мере, в России) используется коаксиальный кабель. Конечно, полностью волоконно-оптическая структура была бы наилучшим вариантом системы передачи, но в настоящее время такое решение экономически необоснованно.

Количество абонентов, которым система способна предоставить обслуживание, должно быть максимально возможным при условии обеспечения приемлемого качества обслуживания для всех абонентов. Это требование диктуется финансовой целесообразностью проекта системы, ресурсы которой необходимо использовать с наибольшей экономической отдачей. Количество абонентов определяется такими показателями как размер области обслуживания, плотность застройки внутри области и процент проникновения (доля потенциальных абонентов в общем числе жителей). Исходя из этого оцениваются ресурсы системы, к которым прежде всего относится емкость головной станции. Различные модели головных станций рассчитаны на разное количество обслуживаемых абонентов. Их число может варьироваться от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч. Хотя количество потенциальных абонентов оценивается на начальном этапе проектирования системы, желательно предусмотреть и возможность будущего расширения системы, которое может быть связано с некоторым увеличением области обслуживания или ростом числа абонентов.

Актуальность перехода на цифровой метод передачи информации сейчас очевидна. Внедрение цифрового телевизионного вещания одновременно решает задачи значительного повышения качества передачи, увеличения канальной емкости системы и совместимости с компьютерными информационными системами. В этом смысле предстоит решить задачу строительства новых систем (или модернизации построенных ранее систем) на единых стандартных принципах, обеспечивающих работу в системах КТВ цифровых телевизоров и других терминальных устройств абонента, например, персонального компьютера. Возможность перестроения системы от аналоговой к цифровой в гораздо большей степени определяется стоимостью нового оборудования

цифровой передачи, чем типом среды передачи, но последнее тоже немало важно, особенно в связи с повсеместным переходом на волоконно-оптические линии связи. Согласно различным экспертным оценкам, доля стоимости волоконно-оптической части системы, включая закупку кабеля и его прокладку, составляет 70 – 75 % от общей стоимости проекта. Поэтому, если система КТВ, имеющая гибридную архитектуру, изначально была построена как аналоговая, то затраты на переход к цифровой передаче будут состоять главным образом из расходов на замену оборудования, а основная (оптическая) часть системы будет способна передавать сигналы цифрового телевидения практически без дополнительных затрат. Канальная емкость цифровой системы передачи несравнимо возрастает по отношению к аналоговой. В зависимости от используемой модуляции в стандартной полосе частот 8 МГц каждого телеканала в цифровом виде можно будет передать от 4 до 10 телевизионных программ и дополнительные потоки цифровых данных. Поскольку стандарт MPEG позволяет передавать сигнал телевидения со скоростью 6 – 10 Мбит/с, то возможна одновременная передача по крайней мере 400 каналов (о соотношении аналоговой полосы частот и цифровой скорости передачи – см. гл. 3).

Современная система КТВ может использоваться для оказания абоненту дополнительных информационных услуг, несвязанных с телевизионным вещанием. Особенно следует отметить предоставление доступа в глобальную информационную сеть Internet. Такие услуги как телеметрия, охранная или пожарная сигнализация, сигналы тревоги и различных датчиков могли быть обеспечены и в аналоговых узкополосных сетях с не очень высоким качеством передачи. К другому типу относятся широкополосные и интерактивные услуги, которые могут потребовать высокого качества. К таким услугам относится телефония и видеотелефония, видеоконференцсвязь, передача данных, передача ТВ программ по запросу абонентов, электронная почта, доступ к справочным службам, заказ билетов и покупок на дому, банковские операции на дому, телеигры, участие в аукционах, опросах общественного мнения и голосованиях. Их интеграция в сеть КТВ возможна только при переходе к цифровому методу передачи.

Цифровая телефония является самой популярной услугой после телевидения. Технология предоставления телефонных услуг в цифровых сетях, работающих по протоколу сетевого уровня IP (Internet Protocol, протокол сети Интернет) называется VoIP. Видео по требованию – самая дорогая на сегодняшний день услуга. В Америке и Европе эта технология сейчас находится на пике своего успеха, поэтому некоторые российские операторы также начали внедрять ее в своих сетях. Схема работы системы достаточно проста: выбранный абонентом видеofilm транслируется с сервера, где он хранится в цифровом виде (в формате MPEG) на абонентский терминал с помощью IP-протокола. Для запроса используется обратный канал. Для организации IP-сети может использоваться как сеть кабельного ТВ, так и любая альтернативная сеть типа Ethernet. Абонентский терминал может представлять собой обыкновенный персональный компьютер с мультимедийными возможностями. Принимая поток MPEG, терминал программно или аппаратно декодирует его в стандартный низкочастотный видеосигнал. Хотя существуют и другие сетевые протоколы, способные обеспечивать названные услуги, Internet Protocol занимает особое место в силу огромной популярности всемирной сети Internet, а с 1998 года он стал абсолютным лидером в организации составных сетей.

Таким образом, современные сети КТВ – это широкополосные двунаправленные системы, предоставляющие абоненту возможность качественного просмотра телевизионных программ по его желанию и доступ к услугам цифровых сетей. Такая сеть будет иметь, как правило, гибридную архитектуру с волоконно-оптическими магистральными направлениями передачи и коаксиальными распределительными сегментами. Полоса системы должна составлять не менее 860 МГц. В последней редакции стандарта верхняя частота увеличена до 1000 МГц.

1.3. Структура кабельных систем

Структура систем кабельного телевидения может различаться в зависимости от их масштаба и функциональной нагрузки. Существует множество вариантов структуры систем КТВ, из которых каждый адаптирован под определенные технические и географические условия проекта, но общие принципы построения системы остаются неизменными. В последующих главах будем подробно рассматривать варианты структуры систем КТВ, а сейчас кратко опишем классическую схему структуры КТВ, чтобы создать общее представление.

Принцип построения системы КТВ таков, что сигнал в ней распространяется от одной точки, называемой головным окончанием системы, к множеству обслуживаемых (сервисных) конечных точек, называемых также абонентскими точками. Иначе говоря, сеть КТВ представляет собой структуру, построенную по принципу “точка – много точек”. На головном окончании системы устанавливается передающее оборудование кабельной системы, образующее в совокупности головную станцию, а в абонентских точках к распределительной кабельной сети подключаются конечные обслуживаемые приборы – телевизионные приемники. Головная станция – это целый комплекс оборудования, включающего в себя каналные узконаправленные антенны, спутниковые антенны, каналные фильтры и каналные усилители, преобразователи частот, модуляторы, передатчики и сумматоры. Ее основная задача заключается в создании закрытого радиоканала для передачи телевизионного сигнала и, возможно, других сигналов. Головная станция может быть лишь ретранслятором телевизионных программ, принимаемых ею по эфирным радиоканалам, но может и сама являться первичным источником телевизионного сигнала, например, в случае трансляции телепрограммы с видеомagneтoфона.

С выхода головной станции сигнал поступает в линейную кабельную сеть, которая также неоднородна и имеет трехуровневую архитектуру. Архитектура кабельной сети включает следующие уровни: транспортный, магистральный и распределительный. На рис. 1.1 показана ее схема. Основной задачей первых двух уровней является передача сигналов на большие расстояния с высоким качеством. Функция третьего уровня заключается в доставке сигналов множеству абонентов. В соответствии с трехуровневой архитектурой в крупной системе кабельного телевидения различают разные типы головных станций. В системах СКТ, которые не имеют транспортного уровня, роль головного окончания играет местная (локальная) головная станция, к которой подключена местная распределительная сеть либо непосредственно, либо через магистральные линии связи. Узловая головная станция (иногда ее также называют подголовной станцией) – это головная станция системы КТВ, обеспечивающая сопряжение транспортной сети с магистральной сетью. Можно также сказать, что

узловая станция – это такая местная станция, которая соединена с другими головными станциями через транспортную сеть. Центральная головная станция – это головная станция крупной системы КТВ, с ее выхода сигнал поступает непосредственно в транспортную сеть. Головная станция любого уровня, таким образом, расположена между выходом источника сигналов и входом линейного тракта нижеследующего уровня сети.

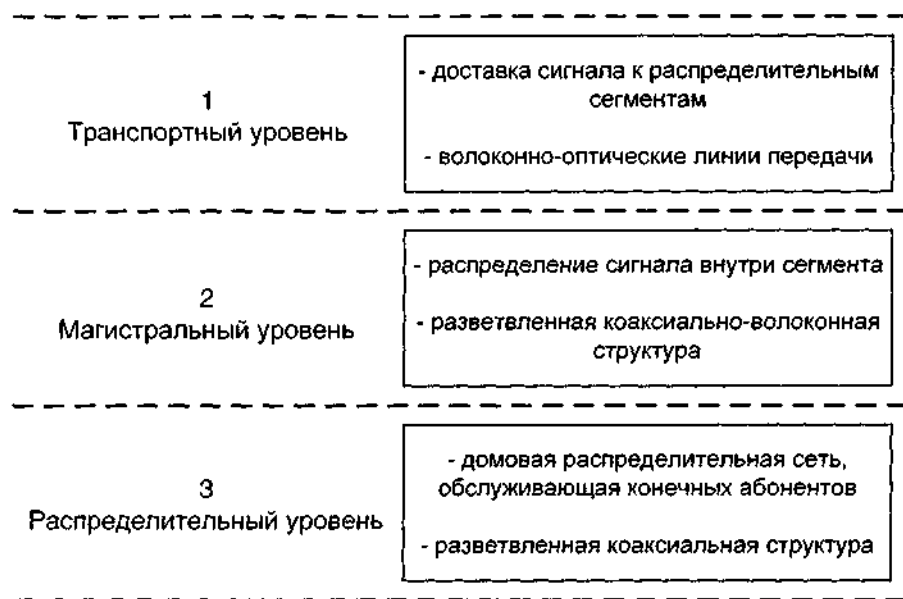


Рис. 1.1. Архитектура системы кабельного телевидения

Рассмотрим подробнее назначение всех трех сетевых уровней системы КТВ. Транспортный уровень является базовым уровнем сети. Качество передачи в транспортной сети должно быть очень высоким, а ее канальная емкость (или скорость передачи) очень большой, поэтому она выполняется на основе волоконно-оптических линий связи. Транспортная сеть соединяет центральный оптический передатчик, установленный на центральной головной станции, с несколькими оптическими приемниками, установленными на узловых станциях. Транспортная сеть, таким образом, является частью линейного тракта между выходом центральной головной станции и входами узловых станций или между несколькими узловыми станциями. Она является полностью оптической частью системы и не требует включения какого-либо линейного промежуточного оборудования.

Магистральная линия соединяет оптический приемник узловой головной станции (или местную головную станцию в СКПТ) с распределительной сетью. Следовательно, магистральная сеть является частью линейного тракта между выходом узловой (или местной) станции и точкой подключения коаксиальной распределительной сети. Этот уровень может строиться, как и предыдущий, на базе волоконно-оптических линий связи, но часто для этого применяется и высококачественный коаксиальный кабель (например, серии 565), специально предназначенный для строительства магистральных линий. В последнем слу-

чае для поддержания характеристик сигнала на приемлемом уровне используются магистральные усилители, включенные в каскад друг за другом. Возможны и варианты комбинирования ВОЛС и коаксиального кабеля в магистрали.

Третий уровень сети КТВ – это уровень домовой и абонентской сети. Распределительные домовые сети подключаются к магистрали с помощью магистральных ответвителей. Строится распределительная сеть на основе коаксиального кабеля типа RG-6 или RG-11. На этом участке используются домовые усилители, устройства распределения сигнала и абонентские ответвители. Абонентские ответвления, выполненные также из коаксиального кабеля (в основном типа RG-6) являются низшим уровнем распределения и заканчиваются абонентскими розетками.

Домовая сеть является самой критичной частью линейного тракта, поскольку она находится на наибольшем удалении от центральной головной станции. Домовая распределительная сеть является наименее помехозащищенной частью распределительной сети, особенно в низкочастотной области спектра. Качеству сигнала в оконечных точках домовой распределительной сети нужно уделять особое внимание, поскольку это является главным критерием работоспособности всей системы.

Участок сети от узловой станции до абонентской розетки в сфере сетевых технологий принято называть “последней милей”. Последняя миля, таким образом, включает магистральный участок и домовой распределительный участок сети. Часть системы, подключенная к выходу узловой станции (т.е. обслуживаемая одним оптическим приемником), образует распределительный сегмент. Распределительный сегмент может быть чисто коаксиальным или состоять из оптической и коаксиальной части. Емкость одного распределительного сегмента может достигать нескольких десятков тысяч абонентов.

Все три описанных уровня обязательно присутствуют только в системах СКТ-4. В системах СКТ-3 может отсутствовать верхний, транспортный, уровень. В системах СКТ-2 присутствуют два нижних уровня – магистральный и домовой – а транспортный уровень отсутствует. В системах класса СКТ-1 присутствует только домовая и абонентская сеть, т.е. только нижний уровень распределения. На рис. 1.2, 1.3 и 1.4 показаны обобщенные структурные схемы телевизионных кабельных систем разных классов. По рисункам видно, что системы классов СКТ-1 и СКТ-2 имеют общие черты – отсутствие транспортного уровня и получение сигнала от независимой местной головной станции. Система класса СКТ-4 не является оригинальным вариантом структуры, а лишь объединяет несколько систем класса СКТ-3 в одну крупную систему посредством транспортной сети таким образом, как показано на рис. 1.5. Центральная головная станция системы СКТ-4 может быть источником сигнала не только для узловых головных станций, но также и непосредственно для распределительного оптического узла магистрали, т.е. выполнять роль узловой станции.

При построении сети внутри одного уровня применяются различные физические топологии или конфигурации соединения устройств. Транспортная сеть строится по кольцевой и звездообразной конфигурации. Наиболее часто используется кольцевая конфигурация, при которой центральная головная станция соединена со всеми узловыми станциями с помощью одной транспортной линии, замкнутой в кольцо. Сигнал в кольцевой структуре транслируется от одной станции к другой по принципу эстафеты, пока его не получают все станции в кольце, причем сигнал может передаваться по кольцу в обоих направлениях.

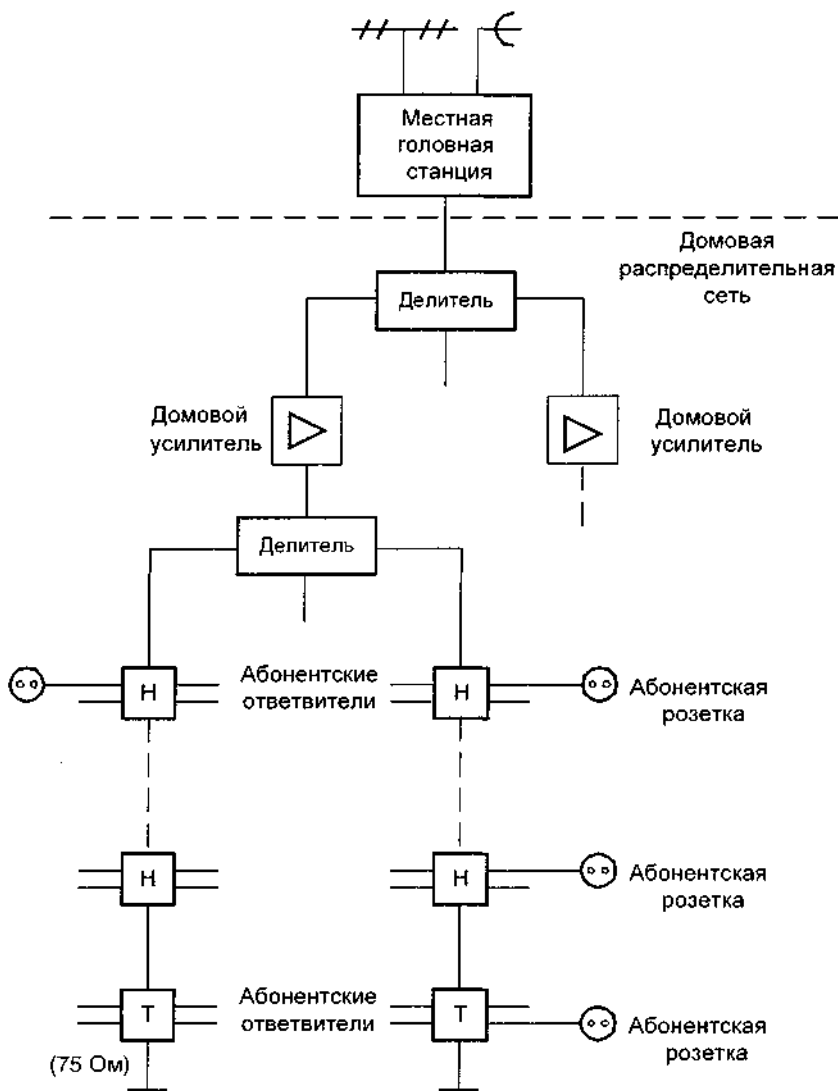


Рис. 1.2. Система класса SKT-1

Звездообразная структура строится по радиальному принципу, при котором транспортные участки передачи расходятся в виде лучей от центральной головной станции. Кольцевая структура является наиболее выгодной, поскольку расход кабеля на ее создание увеличивается незначительно, но при этом обеспечивается резервирование в системе – если один участок кольца выходит из строя, вся система в целом остается работоспособной. Тем самым повышается надежность системы, что особенно важно на транспортном уровне сети. В звездообразной структуре при выходе из строя одного участка транспортной сети работоспособность всей системы не нарушается, но резервирование не обеспечивается. Древоподобная структура широко применяется на магистральном и домовом уровнях распределения. Она представляет собой одну

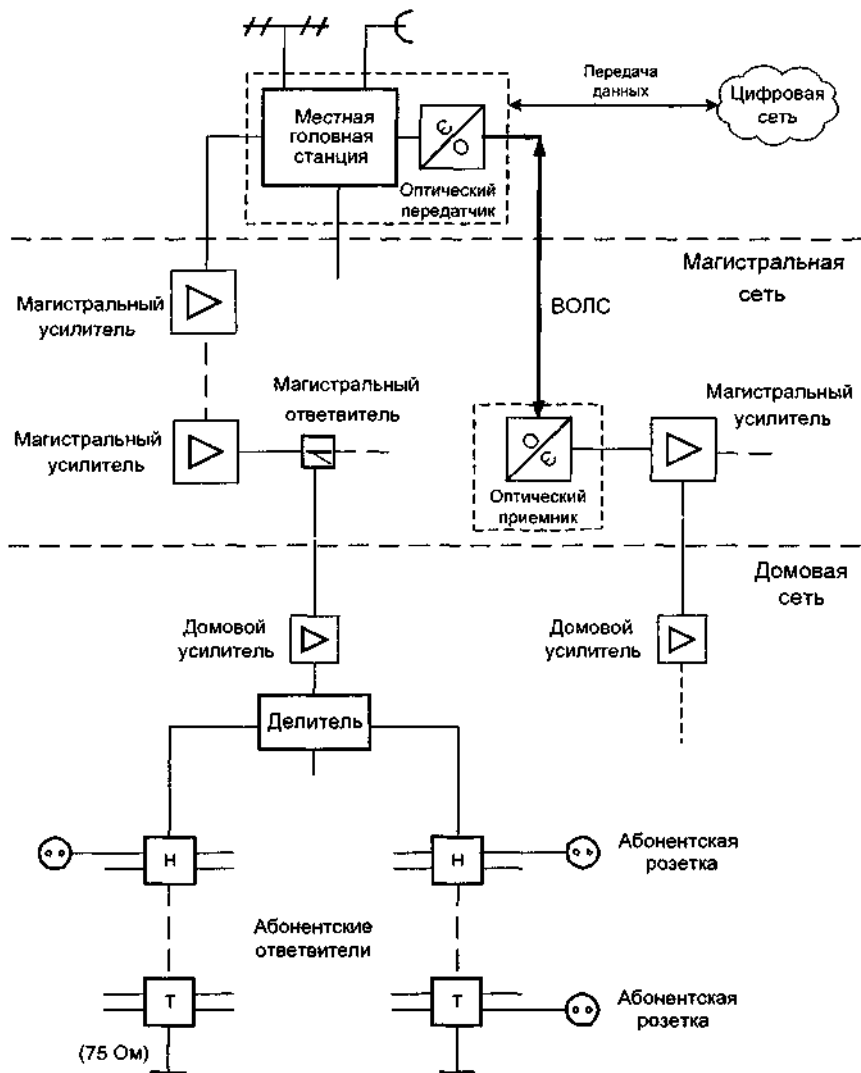


Рис. 1.3. Система класса СКТ-2

ветвь, в которой все блоки расположены друг за другом (ее также можно представить как кольцо, но незамкнутое). В древовидной структуре при нарушениях на одном участке сети может нарушиться работа всей системы или, по крайней мере, большей ее части. На рис. 1.5 показаны обобщенные схемы сетей, построенных по топологиям дерево, звезда и кольцо.

Сеть магистрального уровня может строиться на основе любой из трех конфигураций. Оптическая часть магистрали, как правило, строится по кольцевой конфигурации. На более низком уровне, сеть практически всегда строится на основе древовидной конфигурации.

Структура каждой отдельной магистральной линии представляет собой дерево, ветвями которого являются домовые распределительные сети, подключенные к магистрали в определенных точках с помощью магистральных ответвителей.

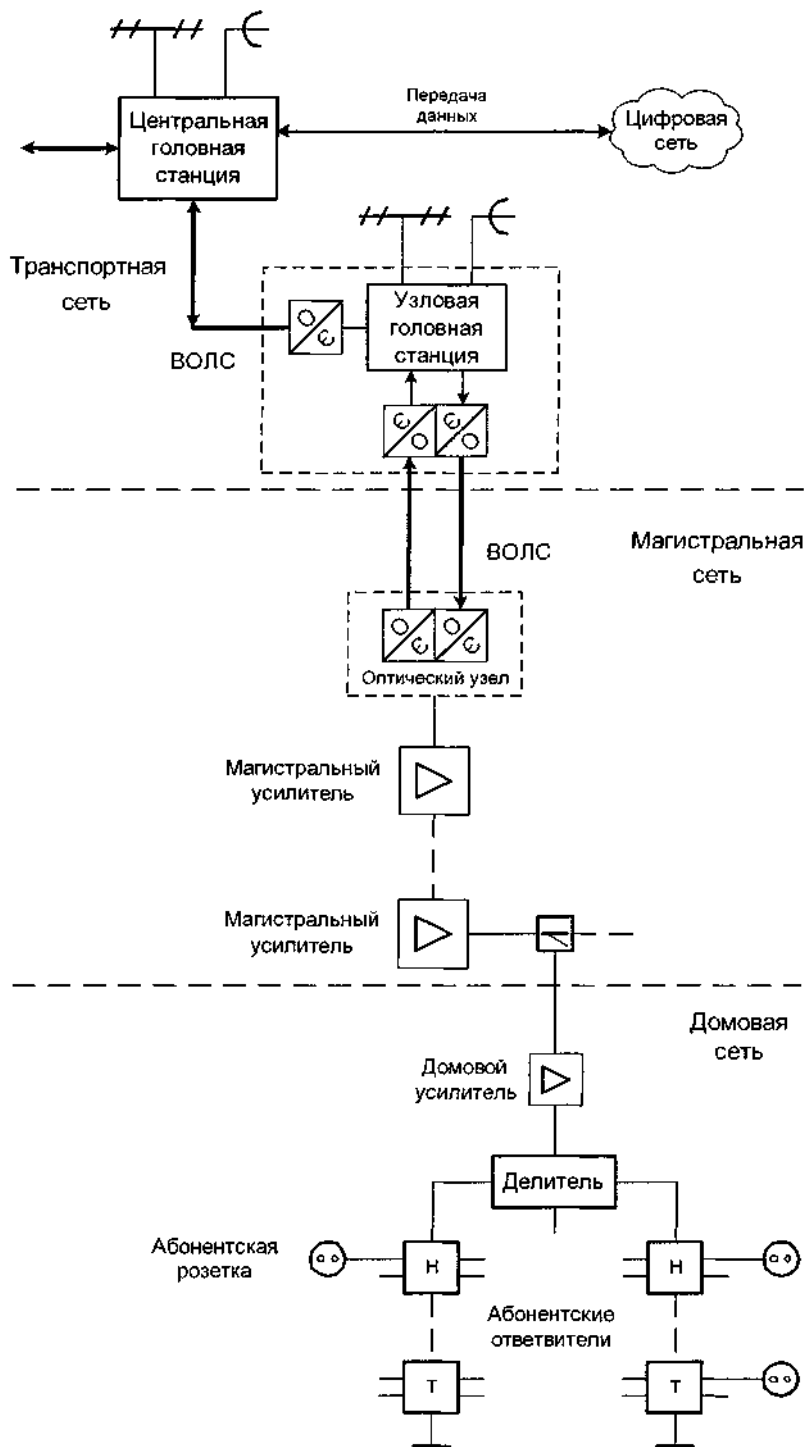


Рис. 1.4. Система класса СКТ-3

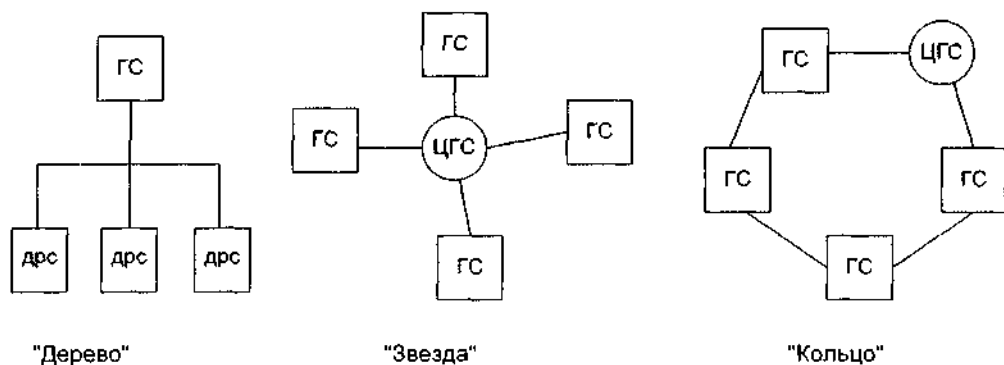


Рис. 1.5. Топологии "дерево", "звезда", "кольцо"

Сама домовая распределительная сеть также строится по принципу дерева, в котором сигнал с выхода домового усилителя разводится с помощью распределительного устройства (делителя) по стоякам или по подъездам многоквартирного дома. Далее, от стояков сигнал доводится до конечных точек сети (абонентских розеток) с помощью абонентских ответвителей, поддерживающих конфигурацию типа дерево или звезда. Выбор того или иного варианта структуры определяется требованиями к надежности системы (степенью резервирования). Также выбор структуры в большой мере зависит от географических условий местности и конфигурации существующей в данной местности кабельной и канализационной инфраструктуры.

1.4. Комплекс оборудования кабельных сетей

Комплекс производимого в настоящее время оборудования, предназначенного для построения современной сети КТВ, содержит множество различных устройств и компонентов. Все оборудование коаксиальных кабельных сетей можно разделить на два больших класса – активное оборудование и пассивное оборудование. Активным называется прибор, потребляющий при работе электроэнергию. К активному оборудованию относятся в основном усилители и источники питания. Пассивное оборудование не требует питания для выполнения своих функций. К пассивному оборудованию относятся различные распределительные устройства, корректоры АЧХ и аттенюаторы. Кабель также можно отнести к пассивной части оборудования. С точки зрения выполняемых функций главное отличие активного оборудования от пассивного состоит в том, что первое, как правило, увеличивает уровень передаваемого сигнала или, иначе говоря, выполняет усиление сигнала. Пассивное оборудование, наоборот, снижает уровень передаваемого сигнала или, что означает то же самое, вносит потери в сигнал.

• Конкретизируем перечень оборудования современных сетей КТВ и приведем основные компоненты, входящие в его состав. Кабельная сеть может строиться на основе следующих компонентов:

- антенные устройства;
- головные станции;
- оптические приемники;

- оптические передатчики;
- широкополосные и диапазонные радиочастотные усилители;
- пассивные распределительные устройства (делители, ответвители);
- сумматоры;
- корректоры АЧХ (эквалайзеры)
- аттенюаторы;
- коаксиальные и оптические кабели;
- источники питания;
- абонентские терминалы.

Головная станция является основой системы кабельного телевидения, обеспечивая трансляцию всех сигналов в кабельную сеть. Головные станции различаются по классам, определяющим их функциональное назначение и масштаб обслуживаемой сети, а также по категориям качества (профессиональная или полупрофессиональная). Профессиональная головная станция должна иметь в своем составе конверторы с двойным преобразованием частоты и встроенное оборудование системного мониторинга для контроля состояния сети. Комплекс приемного антенного оборудования можно рассматривать как часть оборудования головной станции.

Оптический приемник и оптический передатчик вместе с оптическим кабелем образуют оптическое звено системы передачи. Оптическое звено имеет два окончания – головное и узловое. На стороне головного окончания оптический приемник и передатчик является частью оборудования головной станции (местной или узловой). На стороне узлового окончания оптический приемник и передатчик образуют оптический узел, предназначенный для обслуживания коаксиального распределительного сегмента. Желательно иметь на узле возможность резервирования оптического оборудования и средства мониторинга коаксиального сегмента.

Радиочастотный усилитель является отновным элементом коаксиальной распределительной сети. Он поддерживает необходимый для обслуживания всех абонентов уровень сигнала в сети, компенсируя потери сигнала в кабеле и распределительных устройствах. Различают магистральные и домовые радиочастотные усилители. Подробнее они будут рассмотрены в главе об активном оборудовании коаксиальных систем передачи.

К пассивным распределительным устройствам относятся делители (распределители) и ответвители. Они предназначены для обслуживания нескольких кабельных направлений передачи. На сегодняшний день в индустрии кабельных сетей существует разделение на профессиональные и бытовые изделия, которые принято различать по цвету корпуса. В светлых корпусах (с покрытием сплавом олово-висмут или никелем) выпускаются изделия профессионального качества, а изделия с желтым корпусом (цинковое покрытие) обладают менее высоким, бытовым, качеством.

Помимо качественных различий по техническим показателям (полоса частот, проходное затухание, равномерность АЧХ и др.) существуют очевидные конструктивные различия этих классов изделий. Основным недостатком желтых изделий является низкое качество разъемов. Качество пайки крышек корпусов у них также оставляет желать лучшего, в результате чего они обеспечивают меньшую помехозащищенность. Цена желтых изделий, разумеется, может быть значительно ниже. То же самое относится и к усилительному оборудованию.

Для создания современных кабельных сетей применяется коаксиальный и волоконно-оптический кабель. Оба типа кабеля имеют свои недостатки и преимущества. В частности, волоконно-оптический кабель выигрывает по ширине доступной для передачи полосы частот и защищенности от внешних помех, но традиционный коаксиальный кабель более дешев и удобен в прокладке. На сегодня оба типа кабеля продолжают активно и наравне использоваться в сетях гибридной архитектуры, каждый на своем иерархическом уровне. Оптический кабель преимущественно применяется на транспортных и частично магистральных линиях, а на основе коаксиального кабеля строится распределительная магистральная и домовая сеть.

Хотя конечным обслуживаемым прибором кабельной сети является телевизор, кроме него, для приема сигналов у абонентов могут устанавливаться терминальные устройства, выполняющие конвертирование частот принимаемых сигналов и (или) декодирование кодированных сигналов. Терминальное устройство может быть индивидуальным, т.е. обслуживающим одного абонента, или коллективным, предназначенным для группы абонентов.

Выбор того или иного компонента или устройства зачастую делается, прежде всего, на основе ценового фактора, однако, выбор должен выполняться с учетом не только стоимости устройства, но и его технических характеристик. При выборе устройства рекомендуется обращать внимание на следующие существенные моменты.

1. Полноту технической документации (спецификации) устройства. Перечень технических характеристик, которые должны быть приведены в спецификации устройства, определяется специально разработанным стандартом, используемым в данной кабельной системе.

2. Соблюдение требований, предъявляемых используемым стандартом к техническим характеристикам устройства. За выполнением этого требования, разумеется, должен следить производитель устройства, но обязанностью разработчика является проверка того, чтобы при строительстве сети использовалась только оборудование одного данного стандарта.

3. Минимальные размеры и вес устройства. Это позволит установить устройство в труднодоступных местах и уменьшит вероятность его кражи.

4. Наличие приспособлений для монтажа и удобство расположения разъемов для подключения устройства.

5. Наличие защитных корпусов у изделий, устанавливаемых вне помещений. Это необходимо для предохранения от механических повреждений и атмосферного влияния. Как правило, профессиональные устройства (например, магистральные усилители) выполнены внутри собственных защитных корпусов, сделанных из антикоррозийного сплава.

Специфическое требование в российских условиях к распределительным устройствам, вызванное плохим заземлением в домах, заключается в необходимости гальванической развязки всех входов и выходов этих устройств по отношению друг к другу. Невыполнение этого требования может привести к выходу из строя отдельных участков кабельной сети. Развязка реализуется путем установки на всех входах и выходах разделительных конденсаторов. Следует иметь в виду, что гальваническая развязка отсутствует у ряда изделий американских производителей.

Для масштабного строительства системы большое значение имеют комплексные поставки оборудования, поскольку затраты зависят от объема закуп-

ки. Номенклатура изделий, производимых большинством фирм, весьма обширна (от головного оборудования до крепежных элементов). Другие производители специализируются на выпуске определенных видов оборудования. Непродуманный поиск и приобретение нужного оборудования может обойтись заказчику лишней потерей времени и средств. Здесь можно порекомендовать по возможности приобретать оборудование какого-либо одного производителя, уже хорошо зарекомендовавшего себя на рынке телекоммуникационного кабельного оборудования. Наиболее надежны в этом смысле устройства таких известных производителей как Wisi, Hirschmann, Ikusi, Terra и некоторых других. Правильнее выбирать поставщика-дистрибьютора, который предлагает широкий спектр оборудования и предоставляет при покупке квалифицированную консультацию по его установке, наладке и эксплуатации. Желательно, чтобы приобретаемое оборудование было сертифицировано. Важно знать, что для сертификации своего оборудования производитель должен провести довольно дорогие тестовые измерения технических характеристик в центре сертификационных испытаний и далеко не каждая фирма, даже специализирующаяся на выпуске определенного вида оборудования, имеет такой сертификат. Дополнительно потребуются приобрести инструмент для разделки кабеля, обжима разъемов, а также различные измерительные приборы.

Кроме вышеназванных компонентов в современной системе КТВ присутствуют элементы, обеспечивающие постоянное управление системой в ходе ее эксплуатации и упрощающие ее техническое обслуживание. Целью всех процедур технического обслуживания является поддержание постоянного качества передачи в системе и, по возможности, обеспечения ее стабильной и непрерывной работы в ходе длительной эксплуатации. Ухудшение показателей качества передачи (шума и интермодуляции) почти всегда связано с изменением уровней передачи. Качество передачи может ухудшаться под влиянием естественных природных факторов, таких как сезонные и суточные колебания температуры окружающей среды, коррозия металлических элементов во влажной или химически активной среде, неблагоприятные погодные условия (сильный дождь, снег, ветер), и прочих факторов, таких как случайный обрыв кабеля или ошибки обслуживающего персонала при установке или настройке оборудования. Учет этих факторов и обеспечение адекватной защиты позволяет сделать качество передачи более предсказуемым и контролируемым.

В задачи технического обслуживания входит периодическое тестирование и измерение технических показателей; регулировка или замена блоков, показатели которых не соответствуют требуемым нормам; восстановление работоспособности системы в случае аварийного повреждения отдельных блоков и участков кабеля. Тестовые измерения составляют основу технического обслуживания (измерениям в системе КТВ посвящена большая часть стандарта ГОСТ Р 52023-2003 и EN-50083). Предварительные испытания на соответствие требуемым техническим показателям проводятся в системе еще до ввода в эксплуатацию с целью ее настройки. Затем, в ходе эксплуатации, измерения должны проводиться регулярно. Кроме этого, каждая последующая установка нового оборудования или расширение системы требует соответствующих измерений. Другим важнейшим критерием служат отзывы абонентов о качестве обслуживания (изображения на экране телевизора или скорости передачи и т.д.). На основе полученных совокупных данных по результатам тестовых измерений и сообщений от абонентов

составляется план технического обслуживания. В современных сетях КТВ задачи измерения и контроля выполняет система мониторинга. Мониторинг осуществляется из центра управления, находящегося на головной станции, и практически полностью автоматизирован. Оператор сети может наблюдать за состоянием всех элементов сети на экране компьютера. Система автоматического мониторинга основана на адресуемости терминалов и блоков линейного оборудования, рабочий статус которых можно контролировать с головной станции путем обмена управляющими сигналами.

1.5. Принципы проектирования кабельных систем

Проект выполняется на основе технического задания, выданного проектной организацией заказчиком проекта (оператором системы КТВ). Нормы, касающиеся состава, порядка разработки и утверждения технического задания, приведены в документе СНИП 11-01-95. Оператор может самостоятельно выполнить проект или обратиться в стороннюю проектную организацию, имеющую разрешение на такие проектные работы. Техническое задание должно включать следующие исходные данные:

- область обслуживания системы КТВ;
- максимальное количество абонентов;
- число транслируемых каналов;
- перечень услуг, предоставляемых абонентам;
- диапазоны частот прямого и обратного каналов;
- характеристики антенного оборудования головных станций;
- используемое головное и абонентское оборудование;
- используемое усилительное оборудование;
- используемые типы кабеля;
- ситуационный план местности с расположением объектов;
- способ электропитания системы;
- места установки головных станций;
- трассы прокладки кабеля;
- условия прокладки кабеля (грунтовая, подвесная, по канализации);
- основные технические показатели системы.

На основании предоставленных данных производится расчет технических и экономических показателей будущей системы, разрабатывается частотный план, составляются топологические карты транспортной, магистральной и распределительной сетей с точками размещения головного и линейного усилительного оборудования и длинами кабельных участков. Готовый проект должен содержать основное техническое решение в виде чертежей и планов сетей с результатами расчетов технических характеристик системы, архитектурно-строительные решения, включающие чертежи помещений для установки оборудования, конструкций для установки антенно-фидерных устройств и креплений мачт, расчет прочности троса в случае воздушной прокладки кабеля, монтажные схемы кабелей и разъемов, расчет численности и состава штата сотрудников, экономическое обоснование, а также сведения об охране окружающей среды.

Процесс проектирования системы КТВ включает несколько этапов, как технического, так и чисто организационного характера. Организационные вопросы рассмотрим позже, а сейчас остановимся на технической реализации проекта. На первом этапе, который можно назвать концептуальным или этапом общего

проектирования, в ходе уяснения и согласования с заказчиком условий технического задания на проект разрабатывается концепция будущей системы. Оценивается ее масштаб и выбирается наиболее подходящий вариант структуры (класс СКТ), производится разбиение области обслуживания на распределительные сегменты (если в системе будет транспортный уровень), выбирают места установки головных станций, определяется, будет система передачи цифровой или аналоговой, оптической, коаксиальной или гибридной, с обратным каналом или без него. На этом же этапе делается выбор головного, усилительного, пассивного оборудования и кабеля для всех уровней системы передачи. Выбор оборудования, как правило, делается самим заказчиком проекта. После этого разработчик переходит к основной расчетной части проекта, которая связана с проектированием основного элемента распределительной кабельной сети – магистрального усилительного участка. На этом этапе учитывается вся нагрузка, которую должен обслуживать данный участок, т.е. потери на всех включаемых в участок ответвителях. Затем выполняется проектирование распределительной сети, путем ее сборки из рассчитанных на предыдущем этапе усилительных участков, рассчитываются показатели качества передачи в магистральных каскадах, включающих требуемое для охвата данной области количество усилительных участков, проектируется система питания кабельной сети (рассчитываются точки установки источников питания на усилительных участках). На последнем этапе уточняются детали, связанные с прокладыванием кабеля, монтажом оборудования, тестированием и настройкой системы.

Методика инженерного расчета системы КТВ должна обеспечивать правильный расчет ее технических показателей и быть универсальной, т.е. применимой к любому типу сети. В последнее время появились множество специализированных программ для расчета показателей сети КТВ. Из наиболее известных программ можно назвать Cable Tools, TV Designer, Antenna Network Design, CATV CAD. Стоимость таких программ может составлять тысячи долл. Эти программы довольно удобны для практического применения и, несомненно, их нужно использовать для автоматизации расчетов. Тем не менее, разработчик кабельной сети должен знать и понимать механизм расчета показателей, чтобы уметь анализировать полученные результаты и принимать правильные решения. Зачастую расчет приходится проводить вручную, чтобы проверить некоторые результаты, отклоняющиеся от ожидаемых значений. В последующих главах будут пояснены принципы расчета кабельной системы и представлены примеры расчета. Воспользовавшись этими принципами, разработчик сможет самостоятельно спроектировать сеть любого масштаба – от небольшой сети коллективного приема до крупной системы масштаба города или округа.

Рассмотрим в общих чертах те особенности передачи сигнала по кабелю, которые учитываются при проектировании кабельных сетей и составляют, собственно, основу методики ее инженерного расчета. Начнем с коаксиальных кабельных систем.

При передаче сигнала по хоть сколько-нибудь протяженной кабельной сети качество сигнала неизбежно ухудшается. Ухудшение качества передачи связано с шумами и искажениями сигнала. Существуют искажения двух типов – линейные и нелинейные. Под линейными искажениями понимается падение уровня сигнала (также используют термины ослабление, затухание или потери сигнала) по мере прохождения сигналом дистанции кабеля. Под нелинейными искажениями понимаются искажения, вносимые активным оборудованием ко-

аксиального тракта, неизбежно возникающие при передаче более двух каналов. Линейные искажения обусловлены двумя причинами. Во-первых, сам кабель вносит в передаваемый сигнал затухание, которое в общем случае зависит от частоты и возрастает с увеличением длины кабеля. Проблема потерь сигнала из-за его затухания является центральной для любой коаксиальной системы передачи. Во-вторых, любое разветвление или ответвление кабеля с помощью пассивных распределительных устройств (ответвителей и делителей), также будет создавать потери сигнала. Ввиду этих двух факторов становится понятно, что для создания кабельной системы какой-либо значительной протяженности необходимо периодически обеспечивать компенсацию потерь сигнала путем его усиления. Для компенсации потерь в линейный коаксиальный тракт включаются широкополосные усилители, которые поднимают уровни всех сигналов в рабочей полосе частот до требуемого значения. Минимальный промежуток системы, в котором осуществляется компенсация потерь, называется усилительным участком. Каждый усилительный участок состоит из одного усилителя, соединительного коаксиального кабеля, и включенных в кабель пассивных распределительных устройств. Поскольку усиление усилителя должно быть равно суммарным потерям на усилительном участке (в кабеле плюс на пассивных устройствах), все потери на участке эквивалентно компенсируются усилением, и, в результате участок имеет нулевое усиление. Схема усилительного участка коаксиальной системы передачи показана на рис. 1.6.

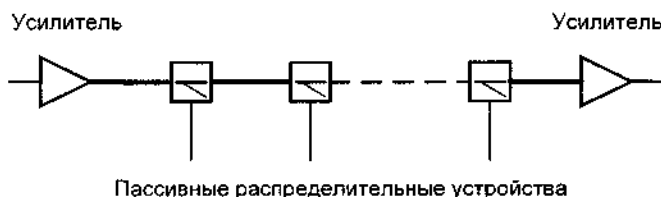


Рис. 1.6. Усилительный коаксиальный участок

Однако, вместе с усилением усилитель вносит в кабельную систему некоторую долю собственного шума, генерируемого его внутренними элементами. Чем более высокого уровня сигнал подается на вход усилителя, тем больший шум он производит. Следовательно, чтобы уменьшить шум достаточно подать на вход усилителя сигнал как можно более низкого уровня. Казалось бы, этим проблема решена, но на самом деле в этом случае сталкиваемся с другой проблемой. Если уровень сигнала на входе усилителя мал, то сам усилитель должен будет обеспечить очень высокое его усиление для полной компенсации потерь в кабеле. Но сложность в том и состоит, что, чем большее усиление создает усилитель, тем сильнее он искажает (нелинейно) сигнал на своем выходе. Нелинейные искажения выражаются в появлении в спектре передачи паразитных частотных составляющих или так называемых колебаний комбинационных частот вследствие неустраняемой нелинейности частотной характеристики его активных элементов. Следовательно, чтобы уменьшить нелинейные искажения необходимо подавать на вход усилителя сигналы как можно более высокого уровня и сделать усиление как можно меньшим. Таким образом, сталкиваемся с дилеммой. Одновременные требования низкого шума и низких нели-

нейных искажений противоречат друг другу – с точки зрения шума выгодно уменьшать входной уровень и, соответственно, увеличивать усиление, а с точки зрения нелинейных искажений, наоборот, выгодно увеличивать входной уровень и уменьшать усиление. Учитывая оба эти ограничения, можно найти оптимальное решение путем компромисса между шумом и нелинейными искажениями, т.е. выбрать некоторые промежуточные значения входного уровня и усиления, при которых и шумы и искажения будут не слишком высоки. В этом случае говорят также, что входной уровень нужно сделать умеренно низким, а усиление умеренно высоким. Идея этого компромисса лежит в основе всей методики расчета при проектировании кабельной коаксиальной системы передачи. Разработчик должен, балансируя между крайними значениями шума и нелинейных искажений, привести их к требуемым (нормативным) значениям путем наилучшего выбора входного уровня и усиления.

Описанный эффект относится к отдельному усилительному участку. В реальных коаксиальных системах, которые строятся из нескольких следующих друг за другом усилительных участков, этот эффект усиливается. В кабельной коаксиальной системе усилители включаются последовательно или, как говорят, в каскад. Оказывается, что в каскаде усилителей шумы и нелинейные искажения имеют очень неприятное свойство – накапливаться при увеличении количества усилителей, поскольку каждый усилитель вносит свой вклад в общее искажение сигнала. При регулярном распределении частот каналов продукты искажений имеют тенденцию собираться в группы (кластеры) вблизи несущих видео и звука в полосе канала. Число различных продуктов в каждой группе быстро увеличивается с ростом числа каналов. В каскаде они суммируются различными путями в зависимости от степени взаимосвязи между передаваемыми сигналами и относительными фазами продуктов искажения. Избежать роста шумов и искажений нельзя, поскольку они обязаны своим появлением самому принципу действия усилительного оборудования. Можно лишь ограничить их, используя как можно меньшее количество усилителей в каскаде коаксиального тракта передачи. В этом смысле задачей является спроектировать систему так, чтобы в ней между головной станцией или оптическим узлом и любой абонентской точкой было включено минимальное количество усилителей. На практике число последовательно включенных широкополосных усилителей ограничено значением, зависящим от шумовых характеристик и степени нелинейности конкретного типа усилителей. Обычно магистральный усилительный каскад включает 6 – 8 усилителей, хотя встречаются и более длинные каскады. Максимальное количество усилителей в каскаде, в свою очередь, накладывает ограничение на протяженность магистрали. Для создания большой кабельной системы приходится устанавливать усилители очень высокого качества или увеличивать количество головных станций. То и другое приводит к увеличению стоимости проекта.

Этих ограничений можно избежать, используя вместо коаксиального магистрального кабеля волоконно-оптический кабель, в котором затухание сигнала очень незначительно. По этому пути пошли США и большинство стран Европы. Там большое распространение получили гибридные кабельные сети, в которых волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) являются основным средством доставки сигналов к распределительным коаксиальным сегментам систем кабельного телевидения. Внутри оптического участка большой протяженности может быть включен оптический усилитель, который является элементом линейного

тракта, обеспечивающим усиление оптических сигналов без демодуляции и регенерации. Однако, на практике в СКТ это почти не применяется, так как сигнал в оптическом волокне можно передавать без регенерации на гораздо большие расстояния (более 100 км), чем в коаксиальном кабеле. Распределительные устройства также редко устанавливаются внутри оптического участка. Отсутствие активных и пассивных приборов на оптическом участке обеспечивает очень высокое качество передачи. Однако не надо думать, что применение оптического кабеля полностью устраняет все возможные проблемы. Оптическим системам передачи также свойственны искажения, только здесь их причинами являются совсем другие физические явления. В оптической передаче нужно учитывать такие факторы как отражение и рассеяние света, дисперсия, дифракция и интерференция, одномодовый и многомодовый режимы распространения света в волокне, длина волны и мощность излучения лазера. Использование технологии оптической передачи ведет к увеличению стоимости проекта. Схема участка оптической системы передачи показана на рис. 1.7.

Кроме шумов, имеющих внутреннюю природу, разбросчик может столкнуться в коаксиальном сегменте сети с проблемой внешних шумов, представляющих собой электромагнитные помехи, которые проникают в спектр передаваемого сигнала. Источниками помех являются радиосистемы, электромоторы, выключатели, линии электропередачи, бытовые электроприборы. Устраняют влияние внешних помех путем частного планирования и применения кабеля с более высоким экранированием.

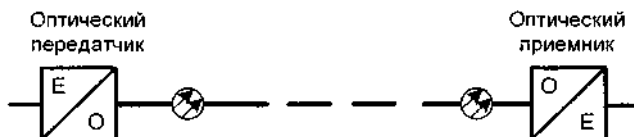


Рис. 1.7. Оптический участок

При расчете технических характеристик системы учитывается множество качественных показателей оборудования, среди которых, отношение сигнала к шуму, затухание сигнала в кабеле, усиление усилителей, неравномерность амплитудно-частотной характеристики, мощность оптического передатчика, динамический диапазон, показатели нелинейных искажений (кроссмодуляция и интермодуляция). В конечном итоге все эти и ряд других показателей определяют параметры сигнала на выходе абонентской розетки. Требования ко всем показателям оборудования и к показателям системы в целом в различных ее точках (в том числе и на выходе абонентской розетки) определяются рядом специально разработанных нормативных документов, составляющих стандарт систем КТВ.

Два предыдущих стандарта ГОСТ 11216-83 и ГОСТ 28324-89, называемые "Сети распределительные приемных систем телевидения и радиовещания", регламентировали только основные параметры распределительных сетей от входа головной станции до выходов абонентских розеток. Они не конкретизировали значения многих параметров, не содержали объективных методов оценки качества принимаемых сигналов и просто устарели по многим показателям и не соответствовали современным требованиям к системам КТВ. Новый ГОСТ Р52023-2003 называется "Сети распределительные систем кабельного телевидения" и по сути значительно отличается от своих предшественников.

В нем, в частности, сведены воедино требования на параметры распределительной сети и методы их измерений; головная станция и линейный тракт выделены как два отдельных звена кабельной распределительной сети и введено нормирование параметров каждого звена и всей КРС в целом; нормированы параметры обратного канала; нормированы уровни радиосигналов, передаваемых в цифровой форме; предложена методика измерения параметров волоконно-оптических участков сети; введены новые требования к важнейшим показателям системы передачи. Этот ГОСТ полностью соответствует рекомендациям международных организаций (МЭК, МСЭ-Р) и, что очень важно, практически соответствует стандарту CENELEC EN 50083, который был принят как единый европейский стандарт распределительных сетей кабельного телевидения. Европейский стандарт CENELEC EN 50083, окончательная редакция которого была принята в марте 1997 года, широко использовался в России в связи с длительным отсутствием современного отечественного стандарта. Членами комитета CENELEC являются национальные электротехнические комитеты Австрии, Бельгии, Дании, Финляндии, Франции, Германии, Греции, Исландии, Ирландии, Италии, Люксембурга, Нидерландов, Норвегии, Португалии, Швеции, Швейцарии и Объединенного Королевства (всего 18 стран). Стандарт EN 50083 называется “Кабельные распределительные системы для телевизионных, звуковых и интерактивных мультимедийных сигналов” и состоит из девяти частей: требования по технике безопасности, электромагнитная совместимость оборудования, активное широкополосное оборудование коаксиальных сетей, пассивное широкополосное оборудование коаксиальных сетей, оборудование головных станций, оптическое оборудование, характеристики системы, интерфейсы для головных станций и оборудования DVB/MPEG-2. Этот стандарт применим к любой распределительной кабельной системе (включая системы индивидуального приема), имеющей коаксиальный кабельный выход и первоначально предназначенной для передачи телевизионных и звуковых сигналов. В нем подробно изложены процедуры измерения основных технических показателей, даны их определения и нормативные значения, учтены особенности стандартов вещательного телевидения разных стран (полоса канала 7 или 8 МГц).

Фактически многие положения EN 50083 используются и сейчас, поэтому далее в тексте будут встречаться ссылки на оба стандарта (EN 50083 и ГОСТ Р52023-2003). Если название стандарта не уточняется, значит имеются в виду оба стандарта.

Технические параметры СКТ нормируются стандартом отдельно для кабельной распределительной сети и головной станции, отдельно прямого и обратного направления передачи. Для прямого направления передачи параметры кабельной распределительной сети нормируются на выходе абонентской розетки, а для обратного направления передачи – на выходе обратного направления линейной сети.

- На выходе абонентской розетки согласно ГОСТ Р52023-2003 нормируются следующие параметры:
 - уровни напряжения радиосигналов изображения и ОВЧ ЧМ вещания в полосе частот распределения радиосигналов (от 60 до 80 дБ-мкВ);
 - разность уровней напряжения радиосигналов изображения и звукового сопровождения в канале распределения (от 10 до 20 дБ);
 - разность уровней напряжения радиосигналов изображения в полосе частот распределения радиосигналов (в полосе 40 – 1000 МГц не более 15 дБ, в поло-

1.5. Принципы проектирования кабельных систем

се 40 – 600 МГц не более 12 дБ, в полосе 40 – 300 МГц не более 10 дБ, в полосе 100 МГц не более 7 дБ, в смежных каналах не более 3 дБ);

- фактические уровни напряжения радиосигналов с цифровой модуляцией в полосе частот распределения радиосигналов (не более 70 дБ-мкВ);

- неравномерность АЧХ каналов распределения радиосигналов вещательного телевидения и ОВЧ ЧМ вещания (в полосе $f_{н.ис}$ – $f_{н.зв}$ не более 3 дБ, в полосе 0,5 МГц не более 0,5 дБ);

- импульсная характеристика (К-фактор) канала распределения радиосигнала вещательного телевидения (не более 7%);

- отношение радиосигнала изображения к шуму в полосе частот канала изображения (не менее 43 дБ);

- отношение радиосигнала цифрового телевизионного вещания к шуму в канале распределения (не менее 41 дБ);

- отношение радиосигнала ОВЧ ЧМ вещания к шуму в канале распределения (при стереофоническом вещании не менее 48 дБ, при монофоническом вещании не менее 38 дБ);

- отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе $IMA_{2,3}$ в канале распределения (не менее 57 дБ);

- отношение радиосигнала цифрового телевизионного вещания к одночастотной помехе в канале распределения (не менее 31 дБ);

- отношение сигнала изображения к фоновой помехе (не менее 46 дБ);

- отношение радиосигнала изображения к составным помехам комбинационных частот третьего CTB_N и второго CSO_N порядков в канале распределения (не менее 54 дБ);

- отношение сигнала изображения к перекрестной помехе (не менее $46 - 10 \lg(N-1)$ дБ, где N – общее число каналов распределения);

- отношение минимального уровня радиосигнала изображения к одночастотной помехе в полосе промежуточных частот телевизора (не менее 10 дБ для МВ, не менее 0 дБ для ДМВ);

- переходное затухание между выходами абонентских розеток (при отсутствии каналов обратного направления не менее 22 дБ, при наличии каналов обратного направления не менее 36 дБ);

- субъективная оценка качества изображения на экране контрольного телевизора, подключенного к абонентской розетке (не ниже 4 баллов).

- На выходе обратного направления линейной сети согласно ГОСТ Р52023-2003 нормируются следующие параметры:

- максимальный уровень напряжения немодулированного радиосигнала на входе обратного направления (не более 114 дБ-мкВ);

- наклон АЧХ в полосе частот обратного направления (не более 10 дБ);

- отношение радиосигнала с цифровой модуляцией к интегральному шуму в канале обратного направления (не менее 25 дБ);

- отношение радиосигнала с цифровой модуляцией к одночастотной помехе в канале обратного направления (не менее 25 дБ).

Требования EN 50083 незначительно отличаются по следующим пунктам:

- уровни напряжения радиосигналов изображения в прямом направлении передачи (от 60 до 80 дБ-мкВ для каналов шириной 7 МГц, от 57 до 77 дБ-мкВ для каналов шириной 8 МГц);

- разность уровней напряжения радиосигналов изображения в полосе распределения (в полосе 47 – 862 МГц не более 12 дБ, в полосе 950 – 1750 МГц не

более 15 дБ, в полосе 60 МГц не более 6 дБ, в смежных каналах не более 3 дБ);

- максимальный уровень напряжения немодулированного радиосигнала в обратном направлении передачи (не более 120 дБ-мкВ);
- переходное затухание между выходами абонентских розеток (в полосе от 47 до 862 МГц не менее 42 дБ для каналов шириной 7 МГц и не менее 36 дБ для каналов шириной 8 МГц; в полосе 950 – 1750 МГц не менее 30 дБ);
- отношение радиосигнала телевизионного вещания к шуму в канале распределения (не менее 44 дБ);
- отношение радиосигнала к шуму в полосе обратного канала (не менее 32 дБ).

Головные станции подразделяют на три категории в зависимости от значений нормируемых на их выходе параметров. Ниже приведена таблица категорий головных станций систем КТВ (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Параметры головных станций по категориям согласно ГОСТ Р52023-2003

Наименование параметра	Категория ГС		
	1	2	3
1. Отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{III(K)}$, обусловленной взаимодействием радиосигналов изображения, звукового сопровождения и цветовой поднесущей, не менее, дБ	66	54	54
2. Эффективность автоматической регулировки усиления (АРУ) при изменении уровня напряжения радиосигнала изображения на входе ГС в диапазоне входных уровней должна обеспечивать изменение уровня радиосигнала на выходе, не более, дБ	1	2	4
3. Затухание несогласованности со стороны входа и выхода (не менее, дБ) соответствует группе исполнения (см. табл. 8.5)	A	B, C	D
4. Отклонение значения несущей частоты от номинального значения (не более, кГц): – радиосигнала изображения – радиосигнала ОВЧ ЧМ вещания	± 50 ± 12	± 75 ± 12	± 250 –
5. Отклонение значения разности несущих частот радиосигналов изображения и звукового сопровождения от номинального значения при модуляции, не более, кГц	± 5	± 15	–
6. Разность уровней напряжения радиосигналов изображения на выходе (не более, дБ): – в смежных каналах – в несмежных каналах	2 3	2 3	– 5

В соответствии с этими категориями параметры нормируются для: головной станции с устройствами усиления и конвертирования по частоте радиосигналов телевидения и ОВЧ ЧМ вещания; головной станции с устройством формирования радиосигнала вещательного телевидения (телевизионным модулятором); головной станции с устройствами сложения радиосигналов на ее выходе.

В частности, для головной станции с устройствами усиления и конвертирования по частоте радиосигналов телевидения и ОВЧ ЧМ вещания нормируются следующие параметры:

- коэффициент шума канального усилителя или конвертора (в полосе 40–300 МГц не более 10 дБ, в полосе 300 – 1000 МГц не более 12 дБ);
- эффективность автоматической регулировки усиления (АРУ) радиосигнала (согласно категории, табл. 1.2);
- диапазон входных уровней напряжения радиосигнала изображения (указывается в технических документах на оборудование конкретного типа);
- отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{III(K)}$ радиосигнала (согласно категории, табл. 1.2);
- отношение радиосигнала изображения к побочным помехам в смежных каналах, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения и звукового сопровождения в канале распределения (не менее 57 дБ);
- максимальный уровень напряжения радиосигнала изображения на выходе при допустимом отношении радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{III(K)}$ и к побочным помехам в смежных каналах (указывается в технических документах на оборудование конкретного типа);
- диапазон регулировки уровня напряжения радиосигнала на выходе (не менее 10 дБ);
- неравномерность АЧХ канала распределения радиосигнала вещательного телевидения (в полосе $f_{н,вз} - f_{н,зв}$ не более 2 дБ, в полосе 0,5 МГц не более 0,5 дБ);
- неравномерность АЧХ канала распределения радиосигнала ОВЧ ЧМ вещания (не более 2 дБ);
- избирательность (в полосе смежных каналов не менее 30 дБ, в полосе зеркальных каналов не менее 57 дБ, в полосе промежуточных частот не менее 50–60 дБ);
- отношение сигнала к фоновой помехе (не менее 52 дБ);
- затухание несогласованности со стороны входа или выхода (согласно категории, табл. 1.2);
- отклонение значения несущей частоты радиосигнала от ее номинального значения при конвертировании (согласно категории, табл. 1.2).

Кроме того стандартом ГОСТ Р52023-2003 определен еще ряд требований к кабельной распределительной сети. В частности, сигналы могут передаваться в полосе 5 – 1000 МГц (по EN 50083 в полосе 5 – 1750 МГц); головная станция кабельной распределительной сети и элементы линейной сети, выполненной на коаксиальном кабеле, должны иметь несимметричные входы и выходы с номинальным сопротивлением 75 Ом; элементы кабельной распределительной сети должны выдерживать механические и климатические воздействия согласно требованиям ГОСТ 11478; надежность кабельной распределительной сети должна обеспечивать соответствие основных параметров требуемым нормам при непрерывной работе сети в течение суток; срок службы кабельной распределительной сети должен составлять не менее 10 лет; кабельная распределительная сеть должна быть сконструирована и построена таким образом, чтобы при ее работе или при неисправностях не возникала опасность пожара, электрического поражения абонента или обслуживающего персонала; элементы кабельной распределительной сети должны соответствовать требованиям

ГОСТ Р МЭК 60065; параметры помехоустойчивости оборудования кабельной распределительной сети должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51513.

Стандарты обязывают производителей оборудования систем КТВ указывать в спецификациях значения всех важнейших параметров. Так, для головной станции наиболее существенным параметром является выходное отношение сигнал/шум, от которого зависит размер области обслуживания. Для усиленного оборудования должны быть указаны полоса частот, коэффициент шума, максимальный выходной уровень и приведенный динамический диапазон. Для пассивного оборудования большое значение имеет степень неравномерности АЧХ в рабочей полосе частот, проходное затухание и развязка между выходами. Для кабелей важнейшими характеристиками являются затухание в рабочей полосе частот и степень экранирования, определяющая их подверженность внешним электромагнитным помехам. Выделение внутри КРС головной станции и линейного тракта как двух звеньев позволяет осуществлять независимый выбор оборудования для каждого звена; производить независимый монтаж и настройку оборудования звеньев; обеспечивать независимый контроль параметров в контрольных точках каждого звена и оперативно устранять найденные неисправности.

Проектировщик должен исходить из того, что система обязана удовлетворять требованиям стандарта к сигналу на выходе абонентской телевизионной розетки, которые определяют *качество обслуживания* абонентов. Качество обслуживания или качество передачи в оконечных точках распределительной сети является главным критерием при проектировании системы. Качество обслуживания определяется степенью искажения сигнала при его распространении по системе передачи от центральной головной станции до абонентской точки. Следует иметь в виду, что в разветвленных и протяженных распределительных структурах кабельных сетей все точки удалены на различные расстояния от головной станции и, следовательно, находятся в изначально неравных условиях. Идеальных условий не существует, поэтому в разных абонентских точках качество обслуживания неизбежно будет несколько отличаться от нормативного. В каждом конкретном случае проект может нуждаться в адаптации к реальным условиям и в пересмотре каких-либо параметров. Разумеется, технически обеспечить высокое качество обслуживания во всех абонентских точках системы возможно, но это приведет к увеличению стоимости проекта. Поэтому проектирование должно выполняться на основе компромисса между качеством системы и ее стоимостью, которая является вторым главным критерием эффективности проекта. Задача проектировщика состоит в том, чтобы обеспечить приемлемое качество передачи в самых удаленных абонентских точках при минимальных затратах на строительство системы. Тем самым, проект выполняется с учетом соотношения "цена – качество".

Отметим особо важность принципа модульного проектирования крупных сетей. Его смысл заключается в разбиении системы на ряд стандартных, функционально обособленных блоков (модулей). Исходные параметры задаются на систему в целом, а разбиение на модули выполняется так, чтобы каждый модуль представлял собой логически и функционально законченный элемент с теми параметрами, которые соответствуют замыслу разработчика. Входные и выходные параметры каждого модуля нормируются и не должны зависеть от его внутренней структуры. Любой сложный модуль можно далее разбить на несколько простых модулей более низкого уровня по тем же правилам. Например,

1.5. Принципы проектирования кабельных систем

в системе КТВ в качестве самого крупного модуля можно выделить коаксиальный распределительный сегмент, обслуживаемый одной узловой станцией (или одним оптическим узлом). Он разбивается на несколько блоков, соответствующих магистральным направлениям передачи этого сегмента. Каждую магистраль, в свою очередь, можно разбить на последовательность стандартных усилительных участков и домовых распределительных сетей. Отдельные модули могут проектироваться разными разработчиками. Затем выполняется сборка системы из таких модулей, при которой необходимо обеспечить их функциональную совместимость путем согласования их входных и выходных параметров. Преимуществами блочно-модульного проектирования является унификация процедуры проектирования каждого стандартного модуля, возможность коллективной работы над проектом и, в результате, гибкость проекта в целом. В плане дальнейшей эксплуатации оператор сети получает возможность улучшения параметров отдельных частей системы без коренной реконструкции и нарушения работоспособности всей системы, а также возможность модернизации системы путем замены устаревших модулей на более современные с такими же входными и выходными параметрами. Но модернизация возможна в разумных пределах, устанавливаемых основными модулями системы (центральной головной станцией и транспортными линиями передачи), поскольку их замена означает, по существу, создание новой сети. Характеристики этих основных модулей определяют такие глобальные показатели системы как метод передачи сигнала, ширина полосы частот, количество обслуживаемых абонентов. Использование метода блочно-модульного проектирования позволяет снизить затраты на разработку и строительство системы, а также избежать появления многих ошибок при проектировании крупных систем.

Если перед проектировщиком стоит задача модернизации ранее построенных разрозненных кабельных систем с целью их интеграции с вновь созданными современными системами, то главным фактором здесь оказывается возможность (или невозможность) использования существующих кабельных структур для передачи сигналов современных систем КТВ, требования к которым сформулированы выше. Эта задача осложняется тем обстоятельством, что большинство эксплуатируемых до сих пор кабельных систем являются системами предыдущего поколения, типа "антенна на подъезд" или СКПТ. Особое внимание при изучении возможности модернизации следует обратить на ширину полосы и наличие обратного канала в системе. Затем потребуются пересчет всех параметров прямого и обратного канала и, вероятнее всего, замена всего активного оборудования. Решающее значение при этом будет иметь величина затрат на такую модернизацию.

1.6. Экономические аспекты построения кабельных систем

С самого начала системы КТВ создавались как системы, рассчитанные на коммерческую эксплуатацию. Прибыль, получаемая от них, складывается из ежемесячной абонентской платы за просмотр телевизионных программ, поэтому финансовый риск при создании этих систем несомненно присутствует. Совершенно очевидно, что только продвижение индустрии кабельного телевидения в большие города с высокой плотностью населения обещало большие экономические выгоды, и было решающим фактором для их дальнейшего развития. Это требовало увеличения передающей емкости системы и улучшения ка-

чества приема по сравнению с общественным эфирным телевидением, поскольку нужно было заинтересовать потребителей в тех районах, где был возможен обычный эфирный прием, доступный без всякой абонентской платы. Для привлечения большего количества абонентов необходимо было предложить расширенный сервис, включающий кроме эфирных телеканалов еще и спутниковые, а также дополнительные услуги, не предоставляемые ранее.

Поскольку строительство сетей КТВ связано с финансовым риском, на первом этапе составляется бизнес-план проекта, в котором учитываются всевозможные факторы риска, содержится описание схемы финансирования, дается прогноз начала поступления прибыли, выполняется анализ востребованности услуг в сфере кабельного ТВ. Строительство кабельной системы, как правило, ведется на деньги, вложенные в этот проект какой-либо инвестиционной компанией, которая хочет иметь сведения о перспективности проекта, о величине затрат и финансовой отдаче. Но даже в том случае, когда строительство финансируется самим оператором сети необходимо сначала сделать расчет экономических показателей будущей системы, т.е. подготовить экономическое обоснование проекта. В экономическом обосновании рассчитывается стоимость строительства и производится оценка эффективности инвестиций (чистая прибыль проекта, рентабельность, сроки окупаемости). Стоимость строительства складывается в основном из стоимости головной станции, затрат на усилительное оборудование, закупку и прокладку кабеля, монтаж и настройку системы. Стоимость головного оборудования составляет большую часть стоимости строительства.

Оценка стоимости создания кабельной сети производится по нескольким удельным показателям. Важнейшим из них являются стоимость системы в расчете на одного абонента. Удельная стоимость на одного абонента может вычисляться отдельно для всех типов используемого оборудования, а именно, для усилителей (магистральных и домовых), для головной станции, для абонентского оборудования. Например, зная общее количество домовых усилителей и тип застройки (количество квартир в доме) в области обслуживания, можно определить, какое количество абонентов в среднем приходится на один домовый усилитель, а отсюда, при известной цене усилителя, рассчитать приблизительную удельную стоимость усилителя на одного абонента. Затем, учитывая стоимость и общую протяженность кабеля, можно рассчитать удельную стоимость всей домовой распределительной сети. В зависимости от типа здания она может варьироваться, например, от 20 до 40 долл. на абонента. Аналогичным образом может быть рассчитана удельная стоимость магистральной сети. Удельную стоимость головной станции определить еще проще, поскольку каждая станция относится к определенному классу, который и определяет максимальное количество абонентов, для которого она предназначена. Получив множество таких оценок по типам оборудования и целым сегментам сети, можно объединить их и рассчитать среднюю удельную стоимость строительства всей системы на одного абонента. Другим удельным экономическим показателем является, при известном числе планируемых каналов, стоимость системы на один канал. Рассчитывается он аналогичным способом. Приблизительная стоимость одного канала головной станции может составлять от 500 до 1500 долл.

В настоящее время кабельные операторы поняли, что привлекать абонентов и повышать конкурентоспособность своей сети нужно не только качеством.

Огромное значение имеют в этом смысле маркетинговые исследования рынка телекоммуникационных услуг и на их основе принятие решений о канальном наполнении кабельной сети, стоимости подключения и величине абонентской платы. Один из путей привлечения абонентов, используемый теперь повсеместно, заключается в разбиении всех передаваемых каналов на пакеты, составляемые на основе изучения спроса и интересов потенциальных подписчиков. В этих пакетах должны присутствовать каналы различной тематики (информационные, спортивные, развлекательные, познавательные, фильмовые), рассчитанные на всю зрительскую аудиторию. Пакеты, как правило, включают разное число каналов и имеют различную стоимость с расчетом на разные слои населения. Кроме того, желательно, чтобы в каждой кабельной сети присутствовал бесплатный (или с минимальной платой) социальный пакет, включающий основные государственные телеканалы. Такое коммерческое предложение со стороны оператора сети КТВ имеет больше шансов на успех.

1.7. Правовые аспекты построения кабельных систем

При наличии готового проекта системы и частотного плана вещания кабельный оператор не может начать строительство без разрешения государственных органов, осуществляющих правовое регулирование взаимоотношений в индустрии кабельного телевидения и наблюдение за предоставлением населению услуг связи. Главным документом, закрепляющим право оператора на эксплуатацию кабельной сети, является лицензия на телевизионное вещание, которую выдает Госсвязьнадзор. Проект и частотный план системы должны пройти экспертизу, после чего также должны быть утверждены в Госсвязьнадзоре. Кроме этого оператор получает в Госсвязьнадзоре разрешение на использование оборудования и разрешение на строительство системы. Помимо этих основных документов оператору необходимо иметь ряд документов, согласующих проектные решения с местными органами власти. Потребуется разрешение на проведение строительных работ, разрешение на установку оборудования в зданиях, разрешение на подключение к местной электросети, согласование с противопожарной инспекцией.

Рекомендуется придерживаться определенного порядка получения оператором сети КТВ документов для ведения своей деятельности. Прежде всего, кабельный оператор должен зарегистрироваться как юридическое лицо в своей региональной Регистрационной Палате. Затем кабельный оператор должен предоставить в региональное Управление Госсвязьнадзора "Заявку на возможность использования частотных присвоений в системах коллективного приема и системах кабельного телевидения". К заявке прилагается пояснительная записка, отражающая характер планируемой деятельности и содержащая информацию о количестве и составе ТВ каналов и других служб, предоставляемых сетью, а также предполагаемый частотный план кабельной сети. Частотный план не должен нарушать действующих требований ГОСТ Р52023-2003 и ГОСТ 18198-89 (Телевизоры. Общие технические условия), исключающих одновременное использование пар каналов, на которых возможно возникновение помехи от несущей изображения по зеркальному каналу приема. Региональное Управление Госсвязьнадзора может потребовать у оператора и другую дополнительную информацию в пределах своей компетенции, например, документ о согласовании территории строительства с местной Администрацией в соответ-

ствии с требованием Лицензионной комиссии Минсвязи России или разрешение на использование радиочастот 87,5–100 МГц для телевизионного вещания (каналы R4 и R5) в соответствии с протоколом решения № 12/2 ГКРЧ России.

Получив все необходимые документы и заявку, Региональное Управление проверяет представленные материалы с учетом вышеперечисленных моментов и по результатам проверки составляет мнение о возможности использования представленного оператором частотного плана на указанной территории с учетом местных условий. Госсвязьнадзор может принять план оператора или предложить ему свой частотный план. После проверки материалы представляются для утверждения в Главное Управление Госсвязьнадзора России с приложением сопроводительного письма, отражающего мнение Регионального Управления Госсвязьнадзора. Главное Управление Госсвязьнадзора России проводит экспертизу, утверждает частотный план и направляет свое заключение об его использовании в Управление организации лицензионной работы Минсвязи России, в региональное Управление Госсвязьнадзора и заявителю (оператору). После получения лицензии и утверждения частотного плана проектная организация должна направить рабочий проект кабельной сети в Госсвязьэкспертизу России. Получив положительное заключение по результатам экспертизы, кабельный оператор должен снова обратиться в Госсвязьнадзор за “Свидетельством о регистрации строительства сети”, чтобы начать строительство. Процесс регистрации строительства регулируется документом “Об утверждении положения о порядке регистрации начала строительства, проведения экспертизы и выдачи разрешений на эксплуатацию построенных объектов связи”. Этот документ содержит еще ряд требований как к заказчику строительных работ (оператору сети), так и к подрядчику, в частности:

- заказчик должен иметь разрешение на использование радиочастот для установки РЭС на объекте связи, которое дает ему право на проектирование, приобретение и импорт РЭС, настройку и испытание объекта связи на электромагнитную совместимость;
- проектная организация должна иметь лицензию на проведение проектных работ на объектах связи;
- подрядчики должны иметь лицензию на проведение геодезических, строительно-монтажных и пуско-наладочных работ;
- заказчик должен иметь договоры с подрядчиками на проведение работ на объекте связи с указанием сроков окончания работ.

По окончании строительства сеть должна пройти процедуру сдачи в эксплуатацию на комиссии, включающей представителей Госсвязьнадзора и других организаций, имеющих отношение к работе сети. По результатам тестовых испытаний сети может быть либо выдано разрешение на эксплуатацию, либо принято решение о доработке или переназначении частот.

Канальное наполнение системы также регулируется законодательно. Если оператор создает свою сеть как сеть ретрансляционного типа, ему нужна только лицензия Министерства Связи, полученная в Госсвязьнадзоре. Если же оператор планирует передавать транслировать в сети какую-либо собственную информацию, например, свой студийный канал или рекламу, ему потребуется зарегистрироваться как СМИ и получить лицензию Министерства Печати и Телерадиовещания (МПТР). Лицензия МПТР необходима и для ретрансляции зарубежных каналов. Со всеми коммерческими каналами (российскими и зарубежными) необходимо заключать договоры на право ретрансляции их про-

грамм. Доступ к ним возможен с помощью профессиональных спутниковых приемников, оснащенных соответствующими декодерами, и авторизованных декодирующих карт стандарта ISO 7816.

Резюме

Использование для передачи закрытой среды распространения электромагнитных волн (кабеля) стало альтернативой передаче сигнала по открытому радиоканалу (в эфире). Активное развитие систем передачи и распределения телевизионных, а затем и других, сигналов с помощью разветвленной коаксиальной кабельной структуры было обусловлено растущим спросом населения на эти услуги. На сегодняшний день подход к построению сетей кабельного телевидения изменился. Широкополосные гибридные оптико-коаксиальные сети (HFC), в которых транспортные и магистральные средства доставки сигнала к коаксиальной домашней распределительной сети строятся на основе волоконно-оптического кабеля становятся все более распространенными.

Почти повсеместно на домашних участках системы и частично на магистралях средой передачи остается коаксиальный кабель. Коаксиальную кабельную систему, создаваемую по древовидной топологии, можно рассматривать как последовательность усилительных участков. В идеале все линейные частотные искажения, вносимые на участке, корректируются внутри данного участка с помощью выравнителя амплитудно-частотной характеристики (эквалайзера), включенного в состав усилителя. Но, кроме того, линейные искажения обязательно корректируются на головной станции. Нелинейные искажения и шумы корректировать невозможно, поэтому одним из главных условий при разработке коаксиальной структуры является недопущение роста шума и нелинейных искажений выше значений, определенных стандартами для телевизионных кабельных систем.

В современных сетях КТВ абоненту будет предоставлен расширенный сервис. В них наряду с телевизионными сигналами передается в интерактивном режиме большой объем данных различных информационных служб и, в частности, данных сети Internet. Последующее развитие кабельных систем пойдет по пути внедрения цифровой передачи и интеграции мультимедийных услуг. Абонентское и головное оборудование постепенно будет меняться. Уже сейчас обыкновенный современный компьютер, оснащенный хорошими звуковой и видеокартой, достаточной оперативной памятью, имеющий порты для подключения внешних устройств, таких как ТВ-тюнер, цифровая видеокамера, сканер, и доступный по стоимости некоторой части представителей среднего класса, является мощным мультимедийным средством приема, передачи и обработки всех мыслимых видов информации. Однако, сама кабельная система как средство передачи и распределения информации будет необходима всегда.

Основными факторами при проектировании любой системы передачи являются следующие факторы: структура системы; метод передачи сигнала; усиление и потери сигнала; соотношение сигнала и шума; нелинейные искажения сигнала; стоимость системы.

От разработчика кабельной системы требуется понимание природы и взаимосвязи этих факторов, а также методов их оптимизации. Далее рассмотрим подробнее каждый из перечисленных факторов.

Глава 2

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для проектирования и строительства систем кабельного телевидения, а также контроля их качественных показателей в ходе длительной эксплуатации необходима, прежде всего, система стандартных единиц измерения. В ходе проектирования она позволяет количественно учитывать основные факторы, характеризующие процесс передачи сигнала, к которым относятся потери, вносимые кабелем и пассивными приборами, усиление, создаваемое усилителями, и многие другие. В ходе эксплуатации она обеспечивает возможность поддержки уровня сигнала и качества передачи во всех точках системы. Любой сигнал, передаваемый по кабельной сети, является электромагнитной волной, поэтому все его характеристики могут быть измерены с помощью стандартных единиц, принятых в электротехнике. В этой главе будут рассмотрены все единицы, применяемые для измерения параметров сигнала и характеристик приборов в сетях кабельного телевидения.

2.1. Параметры электромагнитного сигнала

Электромагнитная энергия распространяется в свободном пространстве и в любом веществе в виде электромагнитных волн, поэтому любой передаваемый по кабельной сети сигнал, электрический или оптический, является электромагнитной волной. Электромагнитная волна, как и любая другая волна, характеризуется, как известно, тремя параметрами – амплитудой, частотой и начальной фазой (рис. 2.1). Кроме амплитуды для сигналов определяют еще среднеквадратическое значение, которое является эквивалентом мощности. Амплитудой, отложенной по вертикальной оси, может быть любая энергетическая характеристика, например, напряженность электромагнитного поля, мощность, ток или напряжение. В электротехнике и, в частности, при проектировании систем передачи информации используют две системы единиц измерения амплитуды – систему абсолютных единиц и систему относительных единиц. Система абсолютных единиц оперирует теми действительными значениями физических величин, которые измеряются в реальном мире (Вольт, Ампер, Ватт). Система относительных единиц имеет дело с отношениями, которые являются универсальными единицами, не привязанными к каким-либо физическим величинам. Базовой единицей относительной системы является Бел. В терминах отношений можно выразить любую абсолютную физическую величину и в этом состоит главное преимущество относительной системы. Удобство относительных единиц также и в том, что их использование значительно упрощает расчеты, которые сводятся всего к двум арифметическим операциям – сложению и вычитанию.

Напомним, что одна полная последовательность значений амплитуды волны, которую она проходит, называется циклом, а длительность одного цикла

называется периодом волны. Длина волны является расстоянием между соседними волновыми фронтами. Разным волнам требуется разное время для прохождения одного цикла, поэтому, для введения общей единицы измерения скорости перемещения волновых фронтов период волны соотносится с 1 с. Количество циклов волны за 1 с является частотой волны (в герцах), поэтому частота f и период волны T связаны простым соотношением:

$$f = \frac{1}{T}.$$

В технике связи, особенно оптического диапазона, часто бывает необходимо преобразовывать значение частоты в значение длины волны и наоборот. Соотношение длины волны и частоты волны устанавливается через скорость распространения электромагнитной волны в данном веществе, которая также называется скоростью света (обозначается буквой "с"). Установлено, что скорость света в вакууме составляет около 299793000 м/с, что обычно округляется до $3 \cdot 10^8$ м/с. В любом веществе свет перемещается с меньшими скоростями, чем в вакууме. Скорости света в разных средах (наиболее часто используется стекло и воздух) различаются при одной и той же частоте волны, поэтому длины волн в стекле и в воздухе при фиксированной частоте будут различны. В одной среде волны разных частот также будут распространяться с различными скоростями. Скорость света в воздухе мало отличается от скорости света в вакууме, поэтому при расчетах эти скорости часто принимают равными. Соотношение частоты и длины волны выражается следующей формулой:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где c – скорость света; f – частота волны; λ – длина волны.

Таким образом, величины λ и f (для данного вещества) эквивалентны, поэтому любые расчеты или оценки характеристик устройств можно выполнять как в терминах длины волны, так и в терминах частоты, в зависимости от удобства в конкретной задаче. При рассмотрении оптических систем передачи чаще пользуются значением длины волны, а для электрических систем чаще пользуются значением частоты.

Если частота f дана в мегагерц, то длину λ волны в воздухе (вакууме) удобно определять в метрах по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{300}{f}.$$

Допустим, что волна, частота которой равна 50 Гц, распространяется в воздухе. Разделив $3 \cdot 10^8$ м/с на 50 Гц, получим, что длина волны составляет 6000 км. Очевидно, на таких низких частотах значение длины волны не имеет практического смысла. Но на частотах диапазона радиовещания ситуация меняется. Из значения длины волны исходят при определении размеров микроволновых волноводов или при оптимизации параметров элементов телевизионных антенн. Например, радиовещательные АМ станции, работающие на частотах порядка 1 МГц используют в качестве антенны вертикальную стальную мачту, высота которой равна четверти длины волны излучения. В таких случаях вы-

числять длину волны необходимо для определения высоты антенны. Расчет высоты антенны h_A для частоты 1 МГц будет следующим:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} = 300 \text{ м};$$

$$h_A = \frac{\lambda}{4} = 75 \text{ м}.$$

Таким образом, длина четвертьволновой антенны, предназначенной для радиовещания на частоте 1 МГц, должна составлять 75 м.

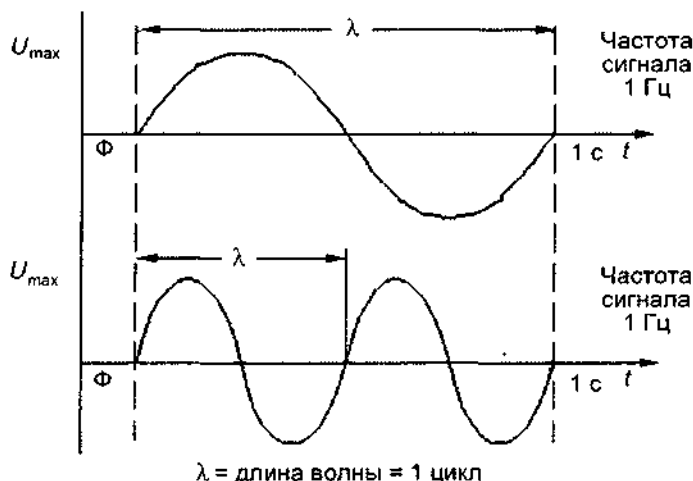


Рис. 2.1. Амплитуда, частота и фаза сигнала

Начальной фазой является смещение волны вправо или влево по горизонтальной оси времени без изменения частоты. В зависимости от соотношения фаз двух волн с одинаковыми частотами говорят о запаздывании или опережении. На рис. 2.1 показаны две волны с частотами 1 Гц и 2 Гц. Обе волны имеют одинаковые амплитуды U_{\max} и начальные фазы Φ . Эти волны могут считаться элементарными сигналами, содержащими информацию только об одном (максимальном) уровне амплитуды или об одной частоте или фазе. Видно, что на временном интервале в 1 с укладывается один период волны с частотой 1 Гц и два периода волны с частотой 2 Гц.

Для масштабирования частоты существует система общепринятых приставок к единице "герц", таких как Кило (10^3), Мега (10^6), Гига (10^9), Тера (10^{12}). При РЧ передаче по коаксиальному кабелю в настоящее время используются частоты от 5 МГц до 900 МГц, но уже сейчас планируется увеличение верхней частоты до 1,5 ТГц. Для масштабирования длин волн для различных диапазонов также используются масштабирующие приставки, такие как санти (10^{-2}), мили (10^{-3}), микро (10^{-6}), нано (10^{-9}). Поскольку длины оптических волн очень малы, их обычно выражают в микрометрах (мкм) или, чаще, в нанометрах (нм).

Не следует связывать электромагнитные волны с каким-либо диапазоном частот или путать их с радиоволнами. Электромагнитные волны могут иметь

любую частоту, как очень низкую, так и очень высокую. Например, частота переменного напряжения в общественной электросети составляет 50 Гц, а частота волн, используемых в спутниковом вещании, составляет от 1 до 10 ГГц, что почти в миллиард раз больше. Тем не менее, в том и в другом случае имеем дело с электромагнитной волной. Понятие “электромагнитная” означает только вид переносимой этой волной энергии. Разделение на диапазоны, хотя и является до некоторой степени условным, отражает тот факт, что волны в пределах любого диапазона имеют сходные физические свойства и поведение, благодаря чему волны одного диапазона могут генерироваться и обрабатываться с помощью приборов, основанных на единой технологии. Например, радиоспектр включает частоты между 8 кГц и 300 ГГц (РЧ). В части радиоспектра на частотах от 50 МГц до примерно 900 МГц работают вещательные станции эфирного и кабельного телевидения. Внутри радиоспектра также существует деление по длине волны на поддиапазоны длинных ДВ, средних СВ, коротких КВ и ультракоротких УКВ волн или аналогичное деление по частоте на поддиапазоны низких частот НЧ (ниже 500 кГц), высоких частот ВЧ (500 кГц – 10 МГц), очень высоких частот ОВЧ (VHF, Very High Frequency, 10 МГц – 500 МГц) и сверхвысоких частот СВЧ (UHF, Ultra High Frequency, выше 500 МГц). В этих поддиапазонах для передачи сигналов, как правило, используются разные методы модуляции.

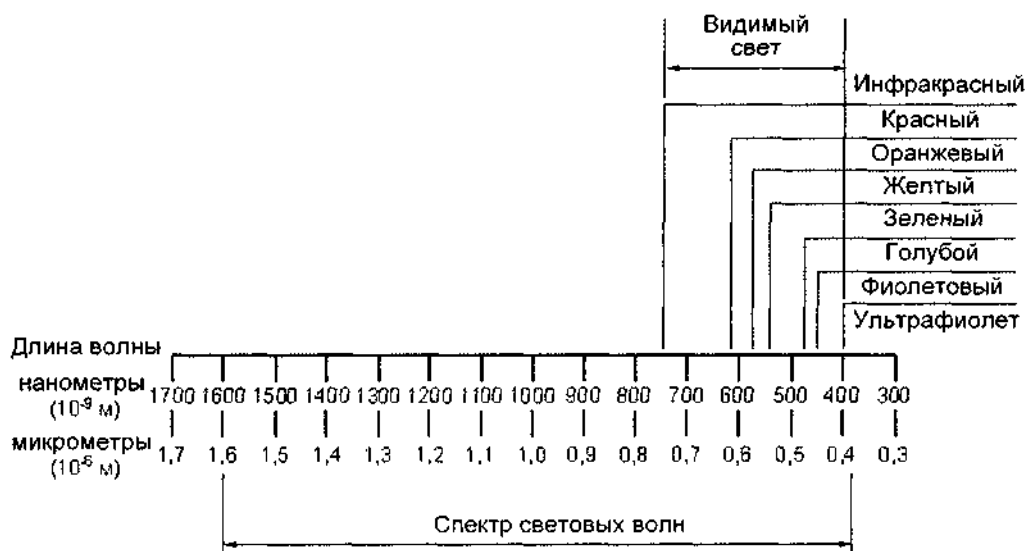


Рис. 2.2. Оптический спектр длин волн

Световые волны, частоты которых измеряются десятками тысяч Гигагерц, также относятся к электромагнитным волнам. Заметим, что при приближении к видимой области спектра для удобства обычно пользуются значениями длины волны, а не частоты. Это также оправдано тем, что характеристики некоторых СВЧ радиочастотных устройств (радиоантенны, волноводы, объемные резонаторы), а тем более, оптических устройств (дифракционная решетка, лазер), напрямую связаны с единицами измерения расстояний. Весь оптический спектр, как он понимается в физике и, в частности, в лазерной технике, занимает очень

широкий диапазон – от ультрафиолетовой области (примерно 300 нм) до середины инфракрасной области (примерно 3000 нм). В оптический спектр включаются те электромагнитные волны, которые обладают сходными свойствами и могут обрабатываться с помощью одних и тех же оптических приборов. В быту часто используется другое определение света, относящееся только к видимой части оптического спектра, которая лежит между 0,4 мкм (400 нм) и 0,7 мкм (700 нм), т.е. от красного света до фиолетового. Поэтому следует иметь в виду, что свет в оптической технике является более широким понятием, чем в быту, а понятия “видимый” и “оптический” не тождественны.

На рис. 2.2 показан в развернутой форме весь оптический спектр по длинам волн. Здесь можно видеть какую небольшую часть оптического спектра занимает видимый спектр. Различные его частоты соответствуют различным цветам зрительного восприятия света. Белый свет содержит все длины волн видимого спектра.

Измерение электромагнитной энергии и мощности в любом диапазоне спектра (видимом или невидимом) называется радиометрией. Фотометрия ограничивается измерениями только в оптической части спектра. Термины радиометрии применимы к любой части электромагнитного спектра, тогда как термины фотометрии применимы только к оптическому излучению. Мощность излучения является основным понятием радиометрии. Существует связь между мощностью излучения в оптическом спектре и мощностью излучения вообще. Тот факт, что излучаемая электромагнитная энергия находится в видимой части спектра, не определяет субъективную интенсивность визуального восприятия этой энергии. Например, синяя лампа может излучать в видимом диапазоне ту же самую мощность в Ваттах, что и зеленая лампа, но зеленая лампа будет казаться ярче, поскольку человеческий глаз более чувствителен к длине волны зеленого света, чем к длине волны синего.

2.2. Абсолютные единицы измерения амплитуды сигнала

Амплитуда сигнала может быть измерена в единицах мощности или в единицах напряжения. Эти единицы эквивалентны и использование тех или других единиц зависит от удобства в конкретном приложении. Связь между действительными значениями напряжения и мощности, как известно, устанавливает закон Ома, который гласит, что разность потенциалов (напряжение), приложенная к сопротивлению значением 1 Ом, создает ток 1 А через это сопротивление.

Ток I и напряжение U в цепи связаны с одной стороны через ее сопротивление R , а с другой стороны через мощность P , выделяющуюся на этом сопротивлении. Эта связь выражается двумя формулами:

$$U = IR, \quad P = UI,$$

где U – напряжение, В; I – ток через сопротивление; R – импеданс или полное сопротивление, Ом; P – мощность, Вт.

Отсюда мощность можно выразить следующими двумя способами:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad P = I^2 R.$$

Закон Ома необходим при расчете уровней сигналов усилителей и систем питания в коаксиальных кабельных системах. Проектирование и техническую поддержку системы можно выполнять, используя только действительные (абсолютные) значения напряжений и мощностей сигналов, но это довольно трудоемкая задача. Например, сигнал на входе длинного отрезка коаксиального кабеля имеет мощность 13,3 мкВт ($1 \text{ мкВт} \approx 10^{-6} \text{ Вт}$). Распространяясь по кабелю, этот сигнал, разумеется, будет иметь на выходе меньшую мощность из-за потерь, вносимых кабелем при передаче. Зная величину мощности, которая была потеряна при прохождении сигнала через кабель и вычитая ее из мощности сигнала на входе кабеля, можно определить какую часть мощности сигнала получим на выходе кабеля. Уровни передачи для пассивных приборов можно вычислить тем же способом. При прохождении сигнала через усилитель мощность усилителя, соответственно, прибавляется к входному абсолютному уровню сигнала. Данным способом можно определить абсолютный уровень мощности или напряжения сигнала в любой точке системы, но при этом может потребоваться пересчет единиц измерения электрических характеристик прибора в используемые единицы измерения абсолютного уровня сигнала. Этот метод работоспособен и технически правилен, но он требует громоздких вычислений, в ходе которых возможны ошибки.

Более удобным является метод использования относительных единиц, в равной степени применимых к потерям или усилению передачи и к мощностям или напряжениям сигнала. Определение уровней сигнала в любой точке системы передачи в этом случае производится простым сложением и вычитанием этих единиц. Именно этот подход, основанный на действиях с отношениями мощностей и напряжений, а не с абсолютными их значениями широко используется в кабельных сетях.

2.3. Децибел – единица измерения отношений

Основным понятием, которым пользуется разработчик кабельной системы передачи является *отношение*. Отношением будем называть частное от деления двух подобных величин, выраженное некоторым числом, независимым от абсолютных значений этих величин. Например, отношение между десятью килограммами и одним килограммом равно 10 или "10 к 1". Отношение между сотней килограммов и десятью килограммами также есть "10 к 1". Заметим, что когда имеем дело с отношениями, не можем правильно выразить в виде отношения какой-либо определенный (абсолютный) вес. В приведенном примере отношение 10 было одинаково применимо для обоих случаев, хотя в каждом случае сравниваемые значения были различны. Однако, как будет видно далее, с помощью отношений можно определять и абсолютные уровни. В технике кабельного ТВ отношения используются очень широко. Так, при передаче по кабелю постоянно сталкиваемся с относительными уровнями мощности сигналов. В примере, приведенном выше, абсолютный уровень сигнала 13,3 мкВт соответствует, как предстоит понять, относительному уровню +30 дБ-мВ. Потери в кабеле также будут определены в виде отношения. Далее будет введено понятие отношения мощностей и относительного уровня сигнала.

Стандартной общепринятой в электротехнике единицей измерения отношения двух уровней мощности, напряжения, тока или интенсивности является Бел, названный по имени английского физика Александра Белла. Сама по себе

эта единица также не может использоваться для обозначения определенного уровня, а используется только для отношения двух уровней.

Дадим определение этой единицы. Величиной 1 Бел будем обозначать отношение 10 к 1, которое всегда вычисляется между двумя абсолютными уровнями сигнала. Рассмотрим следующий пример. Если на входе некоторого прибора сигнал имел мощность 10 Вт (абсолютная мощность сигнала измеряется в Ваттах), а на выходе этого прибора сигнал имеет мощность 100 Вт, то отношение выходной мощности к входной равно 10. Поскольку уровень на выходе прибора выше чем уровень на его входе, то говорят, что прибор создает усиление сигнала и величина этого усиления составляет +1 Бел. Аналогичная ситуация будет с прибором, имеющим входной уровень 100 Вт и выходной уровень 1000 Вт. Поскольку отношение между выходным и входным уровнями мощности есть 10 к 1, этот прибор также создает усиление +1 Бел.

Бел может быть и положительной и отрицательной величиной. В случае положительного значения она обозначает усиление, а в случае отрицательного значения она обозначает потери. Например, если на входе участка кабеля было 100 Вт, а на его удаленном конце получено 10 Вт, то отношение выходной мощности к входной будет равно 1 к 10. Таким образом, на входе кабеля сигнал сильнее, чем на выходе, и про такой кабель говорят, что он создает потери. Эти потери определяются значением -1 Бел. Аналогично, если на входе некоторого прибора было 10 Ватт, а на выходе 1 Ватт, то отношение составляет 1 к 10 и выражается отрицательной величиной -1 Бел. Бел является общепринятой и удобной в техническом отношении единицей измерения отношений, но, как правило, в кабельных сетях приходится работать с более маленькими отношениями. Из этих соображений в качестве стандартной была принята единица 1 децибел (обозначается дБ).

Децибел (дБ, dB) является десятой частью Бела, т.е. справедливо равенство $10 \text{ дБ} = 1 \text{ Бел}$. Во всех отношениях децибел применяется точно также как Бел. Значение в дБ может быть положительным или отрицательным, обозначая либо усиление, либо потери передачи. Сам по себе децибел не может выражать какого-либо определенного уровня мощности, а только отношение между двумя абсолютными уровнями мощности. Соответствие между отношениями мощности, значениями в Белах и значениями в децибелах представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Белы и децибелы

Отношение мощностей	Значение в Белах	Значение в децибелах
1 к 1	0	0
2 к 1	0,3	3
10 к 1	1	10
100 к 1	2	20
1000 к 1	3	30
10 000 к 1	4	40

Белы и децибелы являются логарифмическими величинами. Это значит, что они определяются не самим значением отношения мощностей, а степенью этого отношения. Так, из табл. 2.1 видно, что значению 1 Бел соответствует отношение 10 к 1, а значению 2 Бел уже отношение 100 к 1. Иначе говоря, единицы бел и децибел имеют нелинейный масштаб, для понимания которого невозможно обойтись без использования логарифмов. Как известно из школьного курса математики, десятичным логарифмом (\lg) некоторого числа называется показатель степени, в которую нужно возвести 10, чтобы получить это число. Например, логарифм числа N равен 4 если $10^4 = N$. Если $N = 1000 = 10^3$, следовательно, $\lg N = 3$. В этих примерах для простоты использовались целые степени числа 10, но, поскольку отношения вычисляются между любыми числами, потребуются логарифмы, не равные целым степеням числа 10. В табл. 2.2 приведены логарифмы некоторых чисел. Эту таблицу запоминать вовсе необязательно, а для быстрого и приблизительного вычисления логарифмов можно пользоваться тем простым правилом, что для чисел меньше 10 значение логарифма меньше 1, для чисел, больших 10 и меньших 100 логарифм всегда находится в пределах от 1 до 2, для чисел от 100 до 1000 логарифм всегда лежит между 2 и 3 и так далее. В технике КТВ применяются только десятичные логарифмы.

Таблица 2.2

Десятичный логарифм

N	$\lg N$
2	0.301
3	0.477
7	0.845
10	1.000
14	1.146
100	2.000
283	2.452

Логарифмический масштаб удобен тем, что через него легко определить в децибелах величину любого отношения (не только кратного 10) между уровнями сигнала. Существует формула для расчета отношения в дБ между двумя абсолютными уровнями мощности P_2 и P_1 , заданными в Вт (как правило, в качестве P_2 берется выходная $P_{\text{вых}}$ мощность, а в качестве P_1 берется входная мощность $P_{\text{вх}}$):

$$\Delta S_{P(\text{дБ})} = 10 \lg \frac{P_{2(\text{Вт})}}{P_{1(\text{Вт})}}.$$

Согласно правилам логарифмирования это выражение можно привести и к другому, возможно, более простому для понимания виду:

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{P_{2(\text{Вт})}}{P_{1(\text{Вт})}} = 10 \lg P_{2(\text{Вт})} - 10 \lg P_{1(\text{Вт})} = S_{P2(\text{дБ})} - S_{P1(\text{дБ})}.$$

Эта формула означает, что если две величины $P_{2(\text{дБ})}$ и $P_{1(\text{дБ})}$ заданы в относительных единицах, то вычисление отношения соответствующих им абсолютных значений P_2 и P_1 можно заменить вычислением разности этих относительных значений. Последнее соотношение является основным расчетным соотношением для вычисления уровней передачи в кабельных сетях.

Здесь и далее буквами U и P будем обозначать абсолютные значения напряжения (в Вольтах) и мощности (в Ваттах), а буквами S_U и S_P – относительные уровни сигналов по напряжению и мощности (в дБ·мВ или дБ·мкВ).

Приведем несколько простых примеров.

Примеры.

1. Мощность сигнала на входе усилителя 2 Вт, а на его выходе 20 Вт. Каково усиление этого усилителя в дБ?

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{20}{2} = 10 \cdot \lg 10 = 10 \text{ дБ}.$$

2. Мощность сигнала на входе кабеля 20 Вт, а на его выходе 2 Вт. Каковы потери в кабеле в дБ?

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{2}{20} = -10 \cdot \lg 10 = -10 \text{ дБ}.$$

3. Мощность сигнала на входе делителя на 2 равна 40 Вт, а на выходе 20 Вт. Каковы потери в делителе в дБ?

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{20}{40} = -10 \cdot \lg 2 = -10 \cdot 0,3 = -3 \text{ дБ}.$$

С помощью приведенной формулы легко вычисляется отношение между любыми двумя уровнями мощности. Наиболее часто встречающиеся и легко запоминаемые отношения мощностей приведены в табл. 2.1. Необходимо также понимать физический смысл отношений. Например, отношение мощностей 2 к 1 равно 3 дБ. Следовательно, удвоение мощности соответствует увеличению уровня сигнала (по мощности) на 3 дБ, а уменьшение мощности в два раза соответствует снижению уровня сигнала (по мощности) на 3 дБ. Увеличение мощности в 10 раз (отношение 10 к 1) соответствует увеличению уровня сигнала на 10 дБ. Уменьшение мощности в 100 раз соответствует уменьшению уровня сигнала на 20 дБ.

2.4. Относительные единицы измерения уровней

Как уже было сказано, сами отношения не соответствуют каким-либо конкретным абсолютным уровням сигнала. Но при расчете кабельной сети необходимо учитывать именно абсолютные уровни, поэтому возникает следующий вопрос – как можно связать отношения с конкретными уровнями сигналов. Для этого необходимо иметь некоторое стандартное значение, относительно которого будет вычисляться любое отношение мощностей. Относительный уровень тогда можно будет рассчитать как отношение измеренной абсолютной мощности к этому стандартному уровню. Таким стандартным уровнем мощности является уровень 0 дБ·мВ (dВmV), который задается как 1 мВ, измеренный на сопротивлении 75 Ом:

$$S_{0U(\text{дБ-мВ})} = 0 \text{ дБ} \cdot \text{мВ} \equiv 1 \text{ мВ}_{R=75 \text{ Ом}}.$$

Относительным уровнем в дБ·мВ, следовательно, является абсолютный уровень, взятый по отношению к некоторому стандартному абсолютному уровню сигнала, в качестве которого здесь принимается 1 милливольт (1 мВ = 10⁻³ В) при сопротивлении 75 Ом. Заметим, здесь указано сопротивление, на котором измеряются абсолютные уровни (75 Ом). Это существенная ссылка, поскольку при том же напряжении 1 мВ на другом сопротивлении уровень мощности будет другим – напряжение 1 мВ, измеренное через любое отличное от 75 Ом сопротивление, не соответствует уровню 0 дБ·мВ. Значение сопротивления 75 Ом является стандартным для всей техники кабельного телевидения, включая выходные сопротивления приборов и характеристический импеданс (волновое сопротивление) коаксиального кабеля.

Не менее часто используются и другая единица – децибел-микровольт (дБ·мкВ). Определяются они полностью аналогично с той только разницей, что за стандартный абсолютный уровень в этом случае принимается 1 микровольт (1 мкВ = 10⁻³ мВ = 10⁻⁶ В). Относительный уровень в дБ·мкВ (дБ·μV) определяется как 1 мкВ, измеренный на сопротивлении 75 Ом:

$$S_{0U(\text{дБ-мкВ})} = 0 \text{ дБ} \cdot \text{мкВ} \equiv 1 \text{ мкВ}_{R=75 \text{ Ом}}.$$

Чтобы представлять, какому абсолютному значению мощности (в ваттах) соответствует каждая из этих двух величин, используем закон Ома. С его помощью можно вычислить абсолютный уровень мощности, соответствующий относительному уровню мощности 0 дБ·мВ и соответствующий относительному уровню мощности 0 дБ·мкВ. В определении децибел-милливольт было задано, что абсолютное значение напряжения составляет 0,001 В на сопротивлении 75 Ом, поэтому абсолютное значение мощности (назовем его P₀) будет равно:

$$P_0 = \frac{U^2}{R} = \frac{0,001^2}{75} = 0,0133 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Следовательно,

$$S_{0P(\text{дБ-мВ})} = 0,0133 \text{ мкВт}_{R=75 \text{ Ом}}.$$

В определении децибел-микровольт было задано, что абсолютное значение напряжения составляет 0,001 мВ на сопротивлении 75 Ом, поэтому абсолютное значение мощности P₀ в этом случае будет равно:

$$P_0 = \frac{U^2}{R} = \frac{(10^{-6})^2}{75} = 0,0133 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Следовательно,

$$S_{0P(\text{дБ-мкВ})} = 0,0133 \text{ нВт}_{R=75 \text{ Ом}}.$$

Перевод величин из одних относительных единиц в другие производится с помощью простого правила, которое выводится путем несложных алгебраических преобразований с применением правил логарифмирования:

$0 \text{ дБ} \cdot \text{мкВ} = 0 \text{ дБ} \cdot \text{мВ} + 60$, для отношения напряжений,

$0 \text{ дБ} \cdot \text{мкВ} = 0 \text{ дБ} \cdot \text{мВ} + 30$, для отношения мощностей.

Таким образом определен тот нулевой уровень, относительно которого будет вычисляться любое отношение и любой уровень сигнала (в дБ·мВ или дБ·мкВ). Установлено, каким величинам в вольтах и в ваттах соответствуют относительные уровни 0 дБ·мВ и 0 дБ·мкВ. Однако теперь необходимо научиться вычислять относительный уровень для любого абсолютного уровня сигнала, и наоборот, вычислять абсолютное значение уровня по заданному относительному уровню.

Заметим, что единицы измерения относительного уровня не привязаны к мощности или напряжению сигнала или какой-либо другой его характеристике. Далее покажем, что относительные уровни сигнала можно измерять как по мощности, так и по напряжению. Примеры будут приведены в единицах дБ·мВ, но с единицами дБ·мкВ расчеты полностью аналогичны.

2.5. Относительный уровень по мощности

Предположим, что измерен уровень мощности 0,0133 Вт в некоторой точке системы. Заметим, что этот уровень гораздо выше, чем 0,0133 мкВт. Следует преобразовать это измерение в относительный уровень (в дБ·мВ) для облегчения использования результатов в последующих вычислениях. Очевидно, для этого нужно применить формулу отношения мощностей:

$$\Delta S_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

Здесь в качестве P_2 будет выступать абсолютная измеренная мощность в ваттах, а в качестве P_1 та абсолютная мощность, которая соответствует уровню 0 дБ·мВ (P_0). Поскольку теперь знаем, какой абсолютному значению в ваттах соответствует уровень относительной мощности 0 дБ·мВ (она определена в предыдущем разделе).

При определении отношения мощностей относительный уровень сигнала по мощности будет равен:

$$S_p = 10 \lg \frac{P_{\text{измер}}}{P_0}, (\text{дБ} \cdot \text{мВ}).$$

В этом случае измеренная мощность составляет 0,0133 Вт, а относительная, как уже определено, составляет 0,0133 мкВт. Подставив эти значения в формулу, получим:

$$S_p = 10 \lg \frac{0,0133}{0,0133 \cdot 10^{-6}} = 10 \lg 10^6 = 60 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Измеренный уровень мощности 0,0133 Вт соответствует уровню +60 дБ·мВ или, иначе говоря, мощность 0,0133 Вт, отнесённая к уровню 0 дБ·мВ, составляет +60 дБ·мВ.

Существуют и другие относительные уровни, используемые в различных инженерных дисциплинах, и их не следует путать с дБ·мВ. В микроволновой и оптической технике, а также в телефонии часто используется относительный уровень 0 дБм. По определению 0 дБм есть уровень мощности, равный 1 милливатту. Заметим, что это менее сложное определение, поскольку здесь уровень не привязан к какому-либо значению импеданса. Уровень 0 дБм всегда равен 1 мВт, не смотря на характеристики сети или прибора, для которых он был определён.

Поскольку известно, что абсолютный уровень мощности 0 дБ·мВ составляет $0,0133 \cdot 10^{-6}$ Вт, а 0 дБм составляет 0,001 Вт, то можно выразить значение 0 дБм в дБ·мВ следующим образом:

$$0 \text{ дБ} \cdot \text{мВ} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \frac{0,001}{0,0133 \cdot 10^{-6}} = 48,76 \text{ дБ} \cdot \text{В}.$$

Аналогично можно преобразовать любые единицы измерения мощности в дБ·мВ. Например, известно, что 1 л.с. равна 746 Вт. Следовательно 1 л.с. можно определить в дБ·мВ следующим образом:

$$1 \text{ л.с.} = 10 \lg \frac{746}{0,0133 \cdot 10^{-6}} = 10 \lg(5,609 \cdot 10^{10}) = 107 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

2.6. Относительный уровень по напряжению

Хотя до сих пор подразумевалось, что уровень сигнала является уровнем его мощности, иногда бывает удобнее производить измерения уровня сигнала в системе по напряжению. Относительный уровень по напряжению измеряется в тех же единицах, что и уровень по мощности, т.е. в дБ·мВ. Так как все измерения в коаксиальных кабельных системах производятся на сопротивлении 75 Ом (кабели, усилители, пассивные приборы имеют волновое характеристическое сопротивление 75 Ом), то все формулы будут совершенно аналогичны тем, что были приведены в предыдущем параграфе.

Поскольку вычисляется отношение напряжений, относительный уровень сигнала по напряжению будет равен:

$$S_U = 20 \lg \frac{U_{\text{измер}}}{U_0}, \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Абсолютный стандартный уровень напряжения E_0 , по отношению к которому рассчитывается любой относительный уровень напряжения равен тому же значению, которое было установлено в определении величины 0 дБ·мВ, т.е. $E_0 = 1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$. Обратите внимание, что ранее, при вычислении уровня мощности использовалось определение "10 log". Его нельзя путать с данным здесь определением "20 log", поскольку в значении коэффициента заключается принципиальное различие между уровнями по мощности и по напряжению. Нетрудно показать, как в последней формуле вместо коэффициента 10 появился коэффициент 20. Для этого воспользуемся формулами из закона Ома и десятичного логарифма отношения.

Закон Ома устанавливает следующее соотношение:

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Формула отношения мощностей определяет значение в дБ:

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

Если подставим выражение мощности из закона Ома в формулу для отношения в дБ, получим следующее:

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{\frac{U_2^2}{R}}{\frac{U_1^2}{R}}.$$

Пользуясь правилами логарифмирования, преобразуем это выражение к окончательному виду:

$$\Delta S_U = 10 \lg \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}.$$

Этот результат, очевидно, совпадает с формулой, приведенной выше для величины относительного уровня напряжения S_U . Этот уровень также отнесен к уровню 0 дБ·мВ и рассчитывается по тем же правилам, но только с учетом напряжения сигнала. Приведем два примера, поясняющих эту формулу.

Примеры.

1. Измеренное на абонентском ответвителе напряжение составило 3,16 мВ. Чему равен этот уровень напряжения в дБ·мВ?

$$S_U = 20 \lg \frac{0,00316}{0,001} = 20 \cdot \lg 3,16 = 20 \cdot 0,5 = +10 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

2. Измеренное на выходе усилителя напряжение составило 39,8 мВ. Чему равен этот уровень напряжения в дБ·мВ?

$$S_U = 20 \lg \frac{0,0398}{0,001} = 20 \cdot \lg 39,8 = 20 \cdot 1,6 = +32 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

2.7. Единицы измерения уровня оптического сигнала

Абсолютная мощность оптического сигнала, как любого электромагнитного сигнала, также может быть измерена в Ваттах, хотя сделать это несколько труднее. После прохождения световой волной некоторого пути мощности оптического излучения измеряют в конечной точке с помощью оптического датчика, принцип действия которого основан на фотоэлектрическом эффекте. Датчик состоит из фотоэлектрического материала, в котором световая энергия в результате столкновения фотонов с атомами материала преобразуется в электрическую энергию (в поток электронов). Измеряя поток электронов, прибор косвенно регистрирует количество фотонов, падающих на поверх-

ность светочувствительного материала. Калибруется прибор так, чтобы представлять это значение в стандартных единицах измерения мощности (обычно мВт или эВ). Энергия одного фотона зависит от длины волны излучаемого света.

Например, фотон красного света несет энергию от 2 до 3 эВ, энергия фотона ультрафиолетового излучения составляет около 300 эВ, а энергия фотона рентгеновского излучения может составлять 40000 эВ. Энергия отдельного фотона очень мала, но источник света за очень короткий промежуток времени излучает огромное количество фотонов. Например, обычный карманный фонарик испускает квинтиллионы 10^{18} фотонов в секунду. Хотя энергия фотона постоянна при неизменности частоты света, количество испускаемых фотонов возрастает с увеличением интенсивности света. Следовательно, тепловая энергия, передаваемая атомам и молекулам вещества, на который падает свет, будет возрастать с ростом интенсивности света и может стать довольно значительной. Это является причиной того, что предмет нагревается под воздействием падающего света.

Мерой энергии света, падающего на поверхность фотоэлектрического материала, является освещенность. Измерение мощности производится через измерение электрической энергии, передаваемой фотонами фотоэлектрическому материалу. Закон обратной пропорциональности квадрату расстояния применим к световым волнам также как и к любым другим, следовательно, освещенность поверхности точечным источником света изменяется прямо пропорционально интенсивности источника и обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Это означает, что если сперва измерить освещенность листа бумаги на расстоянии двух м от источника, а затем измерить ее на расстоянии одного метра от источника, то второе значение освещенности будет в четыре раза больше, чем первое.

Мощность светового излучения есть энергия излучения, приходящаяся на единичный объем. Она также определяется как поток лучистой энергии, в единицу времени. Мощность светового излучения измеряется в стандартных единицах мощности – Ватт или электрон-Вольтах. Как известно из школьного курса физики, мощность равна отношению работы ко времени, а работа, равная потенциальной энергии, является произведением силы и расстояния ($1\text{Н}\cdot 1\text{м} = 1\text{Дж}$).

При определенных условиях атомы вещества излучают на всех частотах электромагнитного спектра. Распределение мощности излучения по длинам волн спектра выражается зависимостью Планка, которая показана на рис. 2.3.

Хотя Ватт является основным количественным показателем мощности сигнала в радиометрии, все расчеты и измерения в системе передачи выполняются в относительных единицах, которые позволяют измерять в универсальных единицах уровень сигнала, потери передачи и усиление, причем точное значение уровня сигнала можно получить простым прибавлением или вычитанием усиления или потерь в децибелах.

В оптической технике пользуются единицами измерения уровня, аналогичными единицам дБ-мВ в электротехнике. В оптических системах передачи относительный уровень мощности выражается единицей “децибел-милливатт” (дБ-м, dB-m). Уровень 0 дБ-м соответствует абсолютной мощности 1 мВт (0,001 Ватт), т. е.:

$$S_{0P(\text{дБм})} = 0 \text{ дБ}\cdot\text{м} = 1 \text{ мВт} = P_0 .$$

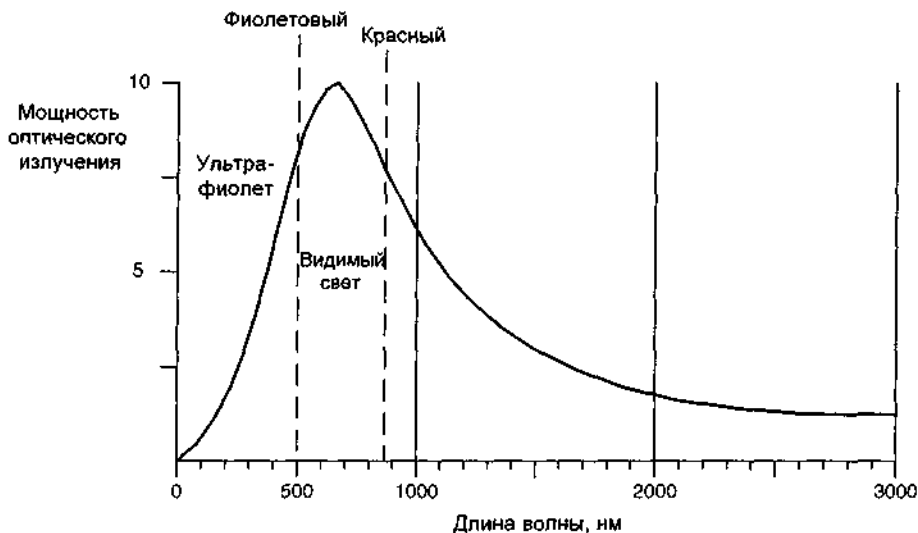


Рис. 2.3. Зависимость мощности излучения от длины волны

Как и ранее при определении относительных уровней вычисляется десятичный логарифм отношения измеренной абсолютной мощности к относительной мощности 1 мВт. Следовательно, относительный уровень оптического сигнала по мощности будет равен:

$$S_p = 10 \lg \frac{P_{\text{измер}}}{P_0}, \text{ дБ}\cdot\text{м}.$$

Отрицательное значение в дБм обозначает, что уровень мощности ниже 1 мВт, а положительное означает, что уровень мощности выше 1 мВт. Например, значение -3 дБм обозначает абсолютный уровень мощности 0,5 мВт, так как -3 дБ по определению есть отношение мощностей, равное одной второй (или один к двум). Величина $+3$ дБм обозначает абсолютный уровень мощности 2 мВт (отношение мощностей два к одному). В приведенной ниже табл. 2.3 даны мощности сигналов, которые часто встречаются в оптических системах передачи, в милливаттах (мВт) и эквивалентные им относительные уровни (дБм).

Таблица 2.3

Мощность оптического сигнала

мВт	дБм
10,00	+10
3,98	+6
1,99	+3
1,00	0
0,50	-3
0,25	-6
0,10	-10
0,01	-20
0,001	-30
0,0001	-40

Уровни сигналов с выхода оптического передатчика и на входе оптического приемника измеряются в дБ·м. Уровень сигнала с выхода оптического передатчика будет отрицательными, если его абсолютная выходная мощность меньше 1 мВт. Если выходной уровень оптического передатчика задан в милливаттах, то преобразование одних единиц в другие выполняется по формуле:

$$P \text{ (дБ·м)} = 10 \lg P \text{ (мВт)}.$$

При известном уровне выходного сигнала передатчика в дБ·м и данных потерях в соединительных оптических кабелях и различных оптических приборах в дБ можно вычислить уровни оптического сигнала на входе приемника.

2.8. Использование относительных единиц в расчетах уровней сигнала

Любой конкретный относительный уровень сигнала, заданный в дБ·мВ, является по существу отношением мощностей или напряжений, поэтому его можно напрямую соотносить с усилением или потерями мощности, заданными в дБ. Это означает, что значения усиления и потерь в дБ и значения уровней в дБ·мВ можно просто вычитать и складывать между собой. Поясним это на примерах расчета уровней сигнала по мощности и по напряжению, встречающихся в типичных ситуациях при проектировании кабельной сети. Перед этим полезно будет еще раз привести все итоговые используемые формулы.

Расчет отношения уровней, дБ: если уровни сигнала заданы в единицах мощности

$$\Delta S_P = 10 \lg \frac{P_2}{P_1};$$

если уровни сигнала заданы в единицах напряжения

$$\Delta S_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1};$$

если уровни заданы в относительных единицах

$$\Delta S_{(\text{дБ})} = S_{2(\text{дБ·мВ})} - S_{1(\text{дБ·мВ})}.$$

Расчет относительного уровня сигнала, дБ·мВ: если уровни сигнала заданы в единицах мощности

$$S_P = 10 \lg \frac{P_{\text{измер}}}{0.0133 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}};$$

если уровни сигнала заданы в единицах напряжения

$$S_U = 20 \lg \frac{U_{\text{измер}}}{0.001 \text{ В}};$$

если уровни заданы в относительных единицах

$$S_{1(\text{дБ·мВ})} = S_{2(\text{дБ·мВ})} - \Delta S_{(\text{дБ})}.$$

Пример 1.

На рис. 2.4 изображен небольшой участок сети, включающий два усилителя и соединяющий их коаксиальный кабель неопределённой длины. Потери передачи в кабеле, представляющие собой отношение между входной и выходной мощностью сигнала, составляют 22 дБ. Известно, что входной уровень сигнала на первом усилителе равен +12 дБ·мВ.

Усиление усилителя, определяемое как отношение между входной и выходной мощностью усилителя, составляет 22 дБ. При известном входном уровне +12 дБ·мВ можно найти выходной уровень простым сложением этих двух чисел:

$$S_{\text{вых ус1}} = 12\text{дБ}\cdot\text{мВ} + 22\text{дБ} = 34\text{дБ}\cdot\text{мВ}.$$

Также зная, что потери в кабеле составляют 22 дБ, определяем уровень на входе второго усилителя вычитанием этого числа из значения +34 дБ·мВ выходного уровня первого усилителя:

$$S_{\text{вх ус2}} = 34\text{дБ}\cdot\text{мВ} - 22\text{дБ} = 12\text{дБ}\cdot\text{мВ}.$$

Затем аналогично, исходя из того, что уровень на входе второго усилителя равен +12 дБ·мВ при его усилении 22 дБ, можно определить путем сложения, что выходной уровень второго усилителя будет также равен +34 дБ·мВ.

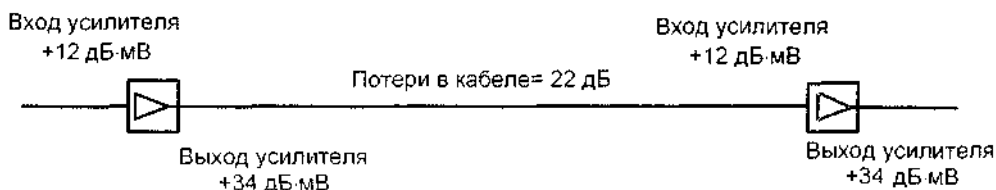


Рис. 2.4. Расчет усилительного участка

Пример 2.

На рис. 2.5 показан делитель на 2, уровень сигнала на входе которого +37 дБ·мВ. По определению, делитель на 2 это такой прибор, который делит входную мощность поровну между двумя выходами. Ранее было показано, что величина 3 дБ представляет собой отношение мощностей "2 к 1". В таком же отношении находится входная мощность делителя и выходная мощность на каждом из его выходов. Следовательно, теоретически потери мощности сигнала при прохождении через делитель составят 3 дБ:

$$S_{\text{вых сп}} = 37\text{дБ}\cdot\text{мВ} - 3\text{дБ} = 34\text{дБ}\cdot\text{мВ}.$$

Однако в действительности делители имеют некоторые собственные (внутренние) потери из-за несовершенства приборов, несоблюдения равенства импеданса на входе и выходе, вследствие чего реальное ослабление сигнала будет выше 3 дБ.

Общепринятым значением внутренних потерь для пассивных приборов является 0,5 дБ, поэтому итоговые потери в делителе составят 3,5 дБ. Тогда уровень сигнала на обоих его выходах будет равен +33,5 дБ·мВ.

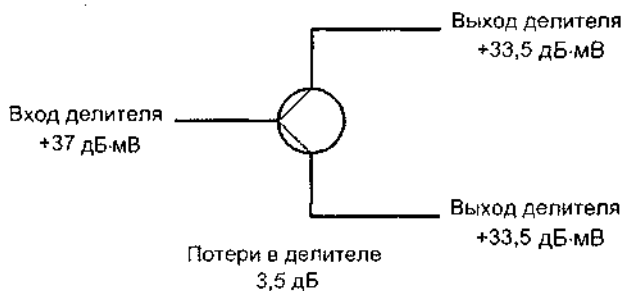


Рис. 2.5. Расчет делителя

Пример 3.

На рис. 2.6 изображен абонентский ответвитель, подключенный к системе коаксиальных кабелей. Входной уровень сигнала равен +46,5 дБ·мВ. Как показано на рисунке, сигнал в основном кабеле при прохождении через ответвитель претерпевает ослабление 0,4 дБ, а ослабление на абонентском отводе составляет 36 дБ. Требуется определить уровни сигнала на абонентском ответвлении и на проходе в основном кабеле.

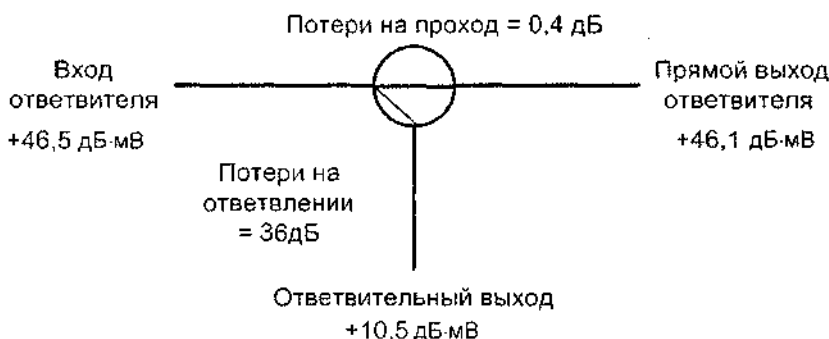


Рис. 2.6. Расчет ответвителя

Выходной уровень сигнала на проходе в основном кабеле будет составлять:

$$S_{\text{вых пр}} = 46,5 \text{ дБ·мВ} - 0,4 \text{ дБ} = 46,1 \text{ дБ·мВ}.$$

Ослабление сигнала в абонентском отводе составляет 36 дБ, следовательно, уровень сигнала на отводящем выходе будет на 36 дБ ниже, чем уровень сигнала на входе ответвителя:

$$S_{\text{вых отв}} = 46,5 \text{ дБ·мВ} - 36 \text{ дБ} = 10,5 \text{ дБ·мВ}.$$

Пример 4.

На рис. 2.7 показан усилитель, включенный между двумя участками коаксиального кабеля. Измеренная мощность сигнала на входе составила 53,1 нВт (1 нВт = 10^{-9} Вт). Измеренная выходная мощность сигнала составила 13,3 мкВт (1 мкВт = 10^{-6} Вт). Требуется найти усиление усилителя в дБ.

Входной уровень сигнала:

$$S_{P_{вх}} = 10 \lg \frac{53,1 \cdot 10^{-9}}{0,0133 \cdot 10^{-6}} = 10 \lg 3,999 = 10 \cdot 0,6 = +6 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Выходной уровень сигнала:

$$S_{P_{вых}} = 10 \lg \frac{13,3 \cdot 10^{-6}}{0,0133 \cdot 10^{-6}} = 10 \lg 1000 = 10 \cdot 3 = +30 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Следовательно, усиление усилителя составляет $30 \text{ дБ} - 6 \text{ дБ} = 24 \text{ дБ}$.

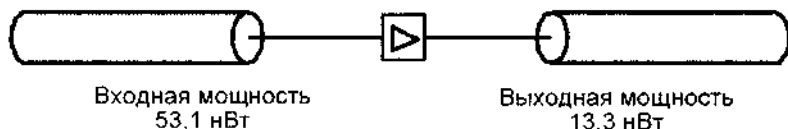


Рис. 2.7. Отношение мощностей

Пример 5.

На рис. 2.8 изображен такой же усилитель, как в предыдущем примере, но уровни сигналов измерены в вольтах. Измеренное напряжение сигнала на входе усилителя составило 2 мВ. Измеренное выходное напряжение составило 31,6 мВ. Требуется найти усиление усилителя в дБ.

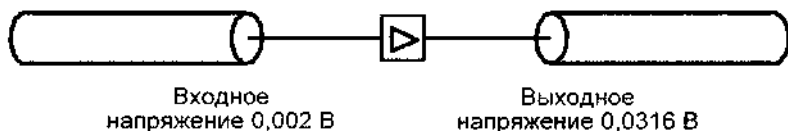


Рис. 2.8. Отношение напряжений

Входной уровень сигнала:

$$S_{U_{вх}} = 20 \lg \frac{0,002}{0,001} = 20 \lg 2 = 20 \cdot 0,3 = +6 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Выходной уровень сигнала:

$$S_{U_{вых}} = 20 \lg \frac{0,0316}{0,001} = 20 \lg 31,6 = 20 \cdot 1,5 = +30 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Таким образом, усиление усилителя составляет $30 \text{ дБ} - 6 \text{ дБ} = 24 \text{ дБ}$.

Заметим, что хотя в одном из этих примеров фигурировали мощности, а в другом напряжения, результаты оказались одинаковыми. Эти примеры демонстрируют очевидное удобство использования относительных единиц (дБ и дБ·мВ) вместо вычисления уровней сигнала, усиления и потерь в абсолютных единицах измерения. Любое значение в дБ·мВ выражает какой-либо конкретный уровень сигнала и мы, не теряя точности вычислений, получаем простой и эффективный метод расчета.

Несколько забегаая вперед, скажем, что с вычислениями уровня по мощности будем сталкиваться при расчете отношения “несущая-шум” (в этом случае используется формула “10lg”). С вычислениями уровня по напряжению сталкиваемся при расчете продуктов нелинейных искажений (используется формула “20lg”). Этим объясняется одно полезное правило, которое будет часто использоваться в последующих главах при расчете качественных показателей усилителя – изменение входного уровня на 1 дБ приводит к изменению отношения “несущая-шум” на 1 дБ, тогда как изменение выходного уровня на 1 дБ приводит к изменению показателя интермодуляции СТВ на 2 дБ.

Резюме

Основной мерой отношений двух любых одностипных величин является децибел (дБ). Важно помнить, что единица дБ определяет только отношение между двумя уровнями сигнала и не может обозначать конкретный уровень сигнала. Например, нельзя сказать, что входной уровень усилителя составляет +12 дБ или уровень сигнала на телевизионном приемнике составляет +3 дБ, такое применение этих единиц технически некорректно.

Вводя стандартный уровень мощности и напряжения для вычислений любых отношений, получаем возможность рассчитать уже не просто отношение двух величин, а относительный уровень, обозначающий конкретное значение сигнала. Единицей измерения относительного уровня мощности и напряжения является децибел-милливольт (дБ-мВ). Она определяет соответствие абсолютных уровней сигнала относительным уровням сигнала. Уровень сигнала, определенный в любых единицах измерения мощности или напряжения всегда можно выразить в дБ-мВ путем простых вычислений. И наоборот, уровень в дБ-мВ может быть затем преобразован в единицы мощности или напряжения, если это требуется. Выражать уровни передачи гораздо удобнее в относительных единицах, чем в абсолютных, поскольку усиление и потери передачи выражаются в децибелах. Величины, заданные в дБ и дБ-мВ (или в дБ-мкВ, или в дБм), сопоставимы друг с другом, поэтому при расчете показателей системы их можно просто складывать и вычитать, получая относительные уровни сигналов в дБ-мВ в любой интересующей нас точке системы. Относительные единицы широко используются в технике кабельного телевидения, а также и в других дисциплинах, касающихся передачи и обработки сигнала.

Заметим, что все единицы измерения, о которых здесь говорится, являются стандартными, т.е. принадлежат к стандартной международной системе единиц СИ. Однако иногда в документации зарубежных производителей используются нестандартные единицы измерения. Особенно это касается единиц измерения массы и длины – вместо килограммов используются фунты (около 0,454 кг), а вместо метров используются дюймы (около 2,54 см), футы (около 0,305 м) и мили (около 1852 м). Например, затухание в кабеле может измеряться в децибелах на 100 футов, удельная масса кабеля в фунтах на фут, диаметры проводников и тросов – в дюймах. Если производитель приводит какие-либо расчетные формулы, нужно обратить внимание на размерности подставляемых в них величин. Для эмпирических формул указанные размерности существенны, и использовать можно только их. Вычислив результат, можно выполнить его обратное преобразование в стандартные единицы измерения – килограммы или

метры. Для преобразования приходится пользоваться таблицами перевода единиц и калькулятором.

В технике связи сверхвысокочастотного и оптического диапазонов часто используется двойная система единиц измерения – электромагнитная волна в разных случаях может характеризоваться либо частотой (Гц), либо длиной волны (м). Это, во-первых, делается для удобства сопоставления характеристик оборудования, а, во-вторых, отражает тот факт, что на частотах этих диапазонов электромагнитная волна начинает проявлять корпускулярные свойства. Между частотой и длиной волны существует однозначное соответствие, которое устанавливается через скорость распространения электромагнитной волны в данном веществе (скорость света). Скорость света в вакууме составляет около $3 \cdot 10^8$ м/с, а в любой другой среде это значение меньше. Важный практический вывод из этого заключается в том, что в одной и той же среде волны разных частот распространяются с различными скоростями. При расчетах скорость света в воздухе обычно принимают равной скорости света в вакууме.

Весь спектр электромагнитных волн, существующих в природе, разделен на диапазоны. Причем, существует деление, как по частоте, так и по длине волны. В состав спектра входят (по мере убывания частоты или возрастания длины волны) космические лучи, гамма-лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, видимый свет, инфракрасный свет, сверхвысокочастотное излучение, радиоволновое излучение, звуковое излучение и инфразвуковое излучение. Спектр радиоволнового излучения лежит между частотами 8 кГц и 300 ГГц. Внутри некоторых диапазонов существует деление на поддиапазоны. Так, например, спектр радиоволн подразделяется на поддиапазоны длинных, средних, коротких и ультракоротких волн (или, по частоте, на поддиапазоны низких, высоких, очень высоких и сверхвысоких частот). Волны в пределах любого диапазона или поддиапазона имеют сходные физические свойства, благодаря чему для их передачи и (или) обработки применяется общий метод. В частности, для передачи сигналов в пределах одного диапазона радиоволн используется один и тот же метод модуляции сигнала.

Глава 3

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА

В этой главе изложены основные сведения о структуре телевизионного сигнала, его спектре, способах формирования отдельного и группового телевизионного сигнала. Определены особенности сигналов аналогового и цифрового телевидения. Все это в совокупности необходимо для понимания принципов действия приемо-передающего оборудования телевизионной сети и распределения частот телевизионного вещания, которое учитывается при формировании частотного плана проектируемой кабельной сети. Формирование частотного плана кабельной сети представляет собой важнейшую задачу, с которой, вероятнее всего, придется столкнуться разработчику на первом же этапе проектирования. Частотное планирование является необходимой мерой для обеспечения приемлемого качества передачи в кабельной сети. Часть главы посвящена качеству передачи. В аналоговых и цифровых сетях качество передачи характеризуется разными параметрами, имеющими, однако, общий физический смысл.

3.1. Физические основы телевидения

В основе систем цветного телевидения лежит теория трехкомпонентного цветового восприятия, согласно которой человеческий глаз воспринимает любой цвет как суперпозицию трех основных цветов: красного, зеленого и синего. Смешивая эти цвета в разных пропорциях можно получить все остальные цвета видимого спектра. Как известно, цвет предмета является его субъективной характеристикой, а физической характеристикой является длина волны его светового излучения. Все предметы, находящиеся вокруг нас, испускают световое излучение, длина волны которого зависит от свойств самого предмета. Все видимые цвета находятся в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Свет с наибольшей длиной волны воспринимается как красный, свет с наименьшей длиной волны воспринимается как фиолетовый, а свет, воспринимаемый как зеленый находится примерно в середине видимого спектра (около 500 нм). Чувствительность глаза к свету разных длин волн различна. Так глаз наиболее чувствителен к зеленому цвету, менее – к красному и еще менее – к синему. Таким образом, любое изображение есть воспринятое сетчаткой глаза и обработанное мозгом световое излучение предмета.

Идея передачи изображения на расстояние довольно проста. При формировании телевизионного сигнала телевизионная камера, на светочувствительные элементы которой поступает первичное (натуральное) изображение, осуществляет спектральное разложение светового излучения на три основные спектральные компоненты: красную E_R , зеленую E_G и синюю E_B . Затем все три цветовые компоненты передаются по каналу связи, а на приемной стороне по тому же правилу производится синтез вторичного (телевизионного) изображения на

экране кинескопа. Для одновременной передачи по существу трех цветковых изображений требуется три передающих и три приемных трубки.

При разработке систем цветного телевидения необходимо было учесть стандарт черно-белого телевидения, что должно было обеспечить одновременное существование цветных и черно-белых телевизоров. Для обеспечения совместимости цветного телевидения с черно-белым по каналу связи передается еще один сигнал, создающий на экране черно-белого телевизора монохромное изображение и называемый сигналом яркости E_Y . Этот сигнал формируется таким образом, что яркость цветных объектов соответствует спектральной кривой чувствительности глаза, т.е. цветопередача осуществляется яркостью цветового тона. Сигнал яркости получается путем сложения в определенной пропорции трех сигналов основных цветов. Для европейского стандарта сигнал яркости составляется из трех сигналов основных цветов в следующей пропорции:

$$E_Y = 0,222 E_R + 0,706 E_G + 0,071 E_B.$$

Электрический сигнал формируется по этому правилу с помощью сумматора напряжений, в котором коэффициенты трех составляющих определяются резисторным делителем. Поскольку в сигнал яркости E_Y уже входит информация о трех сигналах, для восстановления полной картины нет необходимости передавать все три цветковых составляющих. Достаточно передать еще два любых цветковых сигнала, причем и они могут быть переданы в сокращенном виде. Полосу цветковых составляющих можно уменьшить, так как при передаче мелких деталей изображения чувствительность глаза к их цвету падает. Кроме того, из цветковых сигналов может быть исключена информация о яркостных соотношениях деталей изображения, так как она полностью присутствует в яркостном сигнале. С учетом этого по каналу связи передаются два цветоразностных сигнала (красный и синий), получаемые вычитанием сигнала яркости из соответствующих цветковых сигналов, и сам сигнал яркости в полной полосе частот.

Для воспроизведения изображения кроме информации о мгновенном значении сигнала яркости необходимо иметь информацию о том, какой геометрической точке изображения эта яркость соответствует. Для этого используется дискретизация, которую нельзя путать с дискретизацией при цифровом преобразовании сигнала, изображения и его развертка. Дискретизация означает разбиение всего изображения на отдельные мельчайшие элементы, размер которых определяется минимальным углом разрешения человеческого зрения, т.е. таким углом, при котором глаз не замечает дискретной структуры изображения. В телевизионном изображении содержатся сотни тысяч таких элементов. Каждому элементу изображения соответствуют свои координаты по горизонтали и вертикали. Внутри элемента яркость постоянна. Развертка применяется для последовательной поэлементной передачи значений яркости элементов во времени (одновременная или параллельная передача значений яркости невозможна ввиду того, что это потребует огромного количества каналов связи). Последовательная передача подразумевает передачу в каждый момент времени только одного значения яркости, но, тем не менее, она возможна, поскольку зрение обладает свойством инерционности, т.е. способностью сохранять зрительное ощущение в течение некоторого времени после прекращения оптиче-

ского воздействия. Поэтому, если частота повторений воспроизведения яркости определенного элемента достаточно высока, то глаз не ощущает мельканий изображения, а воспринимает его как слитное и непрерывно светящееся.

Развертка превращает исходное изображение в последовательность аналоговых электрических сигналов на передаче и формирует из этих сигналов телевизионное изображение на приеме. В приемном и передающем оборудовании развертка должна осуществляться синхронно и по одному и тому же правилу. Существует множество способов развертки изображения. В телевизионном вещании принята линейно-строчная развертка, при которой электронный луч перемещается по изображению слева направо и сверху вниз. Один проход луча слева направо описывает одну строку изображения. Совокупность всех строк изображения называется кадром. Скорости прохода вдоль строки и чередования строк должны быть постоянны на приеме и передаче. Для обеспечения этого в конце каждой строки и каждого кадра передаются синхроимпульсы. Синхроимпульсы располагаются на так называемых площадках гасящих импульсов, длительности которых соответствуют времени обратного хода луча справа налево (время возвращения луча к началу строки). Во время обратного хода луч не производит никаких изменений в изображении, поскольку уровень сигнала в это время чуть ниже уровня черного цвета. Уровень синхроимпульсов, в свою очередь, еще ниже. По этим строго определенным уровням телевизионный приемник и разбивает телевизионный сигнал на отдельные строки, из которых затем устройства развертки восстанавливают переданное изображение. Сигнал, несущий всю вышеназванную информацию, называется полным телевизионным сигналом, передаваемым в эфир или в кабельную сеть на несущей частоте определенного ТВ канала.

По способу передачи ТВ сигнала все телевизионные технологии можно разделить на два класса – аналоговые и цифровые. Далее рассмотрим отличительные особенности сигналов аналогового и цифрового телевидения, но перед этим обсудим важнейшие понятия систем передачи – модуляцию и мультиплексирование сигналов.

3.2. Методы модуляции сигнала

Как известно, *модуляция* – есть процесс изменения амплитуды, частоты или фазы несущего сигнала в соответствии с изменением амплитуды, частоты или фазы другого сигнала, который содержит полезную информацию. В соответствии с этим различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую модуляцию (ФМ). Однако, как показывают несложные математические преобразования, фазовая модуляция сводится к частотной, т.е. не является самостоятельным видом модуляции. Следовательно, в действительности существует два оригинальных метода модуляций – амплитудная и частотная. Есть несколько разновидностей амплитудной модуляции (например, балансная и однопольная АМ), несколько разновидностей частотной модуляции (угловая и тональная ЧМ), а также комбинированные методы модуляции (амплитудно-частотная или амплитудно-фазовая). На рис. 3.1 показана модуляция АМ и ЧМ.

Модуляция необходима для передачи информационного сигнала по каналу связи. Само понятие модуляции имеет отношение к аналоговым системам передачи, поскольку подразумевает наличие несущего колебания, названные выше параметры которого изменяются по закону информационного (модули-

рующего) сигнала. У всех методов модуляции есть нечто общее – в них несущее колебание изменяется непрерывно. Основными характеристиками модулированного сигнала являются ширина полосы частот модулированного сигнала и глубина модуляции. Суть цифровых методов передачи заключается в том, что сигнал представляется в дискретной форме, которая может выражаться наличием или отсутствием напряжения сигнала или длительностью некоторого напряжения сигнала. Передаваемый по каналу сигнал в этом случае представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, как правило, двух уровней. Такая последовательность импульсов называется цифровым или битовым потоком. Основными характеристиками цифрового потока являются скорость передачи двоичных символов, которая также называется битовой скоростью, и вероятность ошибки при передаче одного бита. При цифровой передаче операция, аналогичная по смыслу модуляции, называется кодированием. Однако, некоторые виды модуляции предназначены специально для передачи цифрового сигнала по каналу низкого качества, по которому непосредственно передать немодулированные импульсы невозможно, например, по эфирному каналу. В этих случаях импульсы накладываются на высокочастотную несущую, а понятие *цифровая модуляция* или *дискретная модуляция* используется именно в этом смысле, т.е. как *модуляция цифрового сигнала*. К таким “цифровым” методам относятся комбинированные методы модуляции – QAM и QPSK (суть этих методов рассматривается далее в этой главе). В результате цифровой модуляции получаем битовую последовательность, модулированную по амплитуде и фазе, которая с помощью определенной несущей частоты может быть передана по каналу точно так же, как и обычный аналоговый сигнал. В каналах высокого качества, например, в волоконно-оптическом канале, прямоугольные импульсы могут передаваться без несущего колебания.

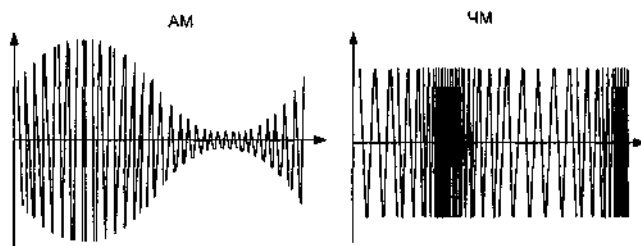


Рис. 3.1. Методы модуляции

У каждого метода модуляции есть свои достоинства и свои недостатки. Сигнал в AM имеет наименьшую из возможных ширину полосы частот, но и наименшую помехоустойчивость. Сигнал в ЧМ имеет большую полосу, но гораздо более высокую помехоустойчивость. Цифровые методы характеризуются повышенной, по сравнению с аналоговыми методами, помехоустойчивостью и оптимизированы по ширине полосы, которая применительно к ним называется скоростью передачи. В системах кабельного телевидения применяются практически все существующие методы модуляции сигнала. В общественном эфирном телевизионном вещании видеосигнал передается в AM, а сигнал звукового сопровождения передается в ЧМ. В спутниковом вещании используется модуляция QPSK. В кабельной сети применяются методы AM, ЧМ, QAM и QPSK.

Цифровые методы в основном применяются в сетях КТВ для организации служб передачи данных, но не так давно в телевизионном вещании тоже стала применяться цифровая модуляция. В целом цифровая модуляция выгоднее по всем показателям. Широкому использованию цифровой модуляции в телевидении пока препятствует тот факт, что наиболее распространенным на сегодня терминальным устройством является аналоговый телевизионный приемник, который может воспринимать только сигналы стандартов PAL/SECAM/NTSC в АМ. Если в этом случае используется цифровая модуляция, то перед подачей сигнала на такой телевизор требуется дополнительное преобразование сигнала, что и делается в большинстве сетей КТВ.

В широкополосных системах КТВ отдельные несущие могут быть модулированы как цифровым, так и аналоговым способом и могут передаваться совместно, например, на основе технологии частотного разделения полосы передачи. Процедура объединения сигналов для их совместной передачи с выделением каждому сигналу отдельной несущей частоты называется частотным мультиплексированием. Мультиплексирование не подразумевает преобразования сигнала. Поскольку каждый сигнал передается на своей частоте и восстанавливается отдельно, то система передачи не диктует необходимости использования какого-либо определенного метода модуляции. Этот метод применяется для передачи множества телевизионных сигналов в системах кабельного телевидения. Современные технологии аналоговой и цифровой передачи полностью совместимы с существующими технологиями мультиплексирования. Заметим, что модуляция отдельного сигнала и мультиплексирование сигналов – это два разных процесса, не связанных между собой и выполняемых различным оборудованием.

3.3. Методы мультиплексирования сигналов

Перед тем, как передать сигналы отдельных ТВ каналов в сеть, необходимо сформировать из них групповой сигнал, как при аналоговой, так и при цифровой передаче. Для формирования группового сигнала применяется специальная методика, называемая *мультиплексированием*. Мультиплексирование означает объединение множества входных каналов связи в один канал связи большей емкости для передачи по единому физическому каналу, т.е. по одной физической среде. При реализации такого объединения каналов одной из основных задач является устранение взаимного влияния соседних каналов. Понятия *уплотнение* и *разделение* являются синонимами мультиплексирования и используются с ним наравне, с тем только различием, что уплотнение относится к передаче, а разделение – к приему. Одна из основных задач мультиплексирования состоит в том, чтобы повысить эффективность использования канала передачи. Мультиплексирование применяется во всех без исключения системах связи и передачи информации, от привычной аналоговой телефонной сети до цифровой компьютерной сети, но в данном случае нас интересует мультиплексирование ТВ каналов. В настоящее время наиболее широко используются три технологии мультиплексирования:

- с частотным уплотнением (разделением) каналов, FDM;
- с временным уплотнением (разделением) каналов, TDM;
- с волновым уплотнением (разделением) каналов, WDM.

При частотном мультиплексировании (Frequency Division Multiplexing, FDM) полоса частот физического канала делится на некоторое число полос (подка-

налов с несущими частотами F_i), соответствующих по ширине одному ТВ каналу (8 МГц для России). Несколько каналов формируют канальную группу. Для ее формирования используется процедура ОБП-ПН – амплитудная модуляция с подавлением одной боковой полосы (левой или правой) и подавлением несущей. Теоретически схема формирования канальных групп может быть разной. В телефонии, например, сформированные на нижнем уровне группы затем также мультиплексируются с другими такими же группами, образуя супергруппы. Этот метод мультиплексирования используется только для аналоговых систем. На рис. 3.2 показан механизм частотного мультиплексирования.

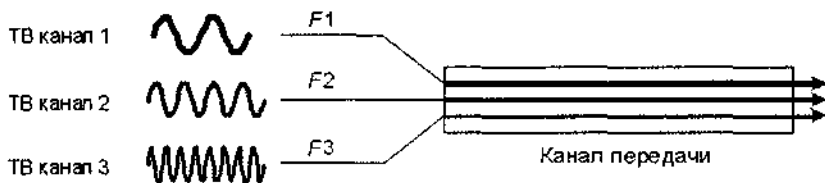


Рис. 3.2. Частотное мультиплексирование (FDM)

При передаче цифровых сигналов с применением модуляции ИКМ, речь о которой пойдет ниже, наиболее удобной является схема мультиплексирования с временным разделением каналов (Time Division Multiplexing, TDM), при которой мультиплексор на передающей стороне с помощью коммутатора подключает последовательно каждый входной канал к передатчику в течение определенного временного интервала Δt , необходимого для передачи некоторой части сигнала. Минимальная передаваемая часть сигнала называется пакетом или ячейкой. Интервал коммутации, в течение которого передается пакет (ячейка), называется временным слотом. Сформированный таким образом поток ячеек с сигналами разных входных ТВ каналов передается по физическому каналу связи. В результате доступ к среде передачи разделяется по временным слотам так, что устройства, формирующие сигналы отдельных ТВ каналов, работают по очереди, в разное время на одной полосе частот. На приемной стороне демультиплексор с помощью аналогичного коммутатора и фильтров нижних частот выделяет отдельные слоты и распределяет пакеты по соответствующим каналам. Важно, чтобы коммутаторы на передающей и приемной сторонах работали синхронно и временные слоты совпадали. На практике для синхронности коммутаторов используется сигнал синхронизации, представляющий собой известную приемнику последовательность импульсов. Для передачи синхроимпульсов может использоваться внешний канал, но чаще используется внутриканальная синхронизация, т.е. процесс синхронизации сводится к вставке дополнительных синхронизирующих импульсов после некоторого числа временных слотов. Совокупность пакетов между синхроимпульсами образует кадр или фрейм (frame). Размер и структура кадра могут быть разными, но они определены для конкретной схемы кодирования. Несколько кадров могут объединяться в более крупную структуру, называемую контейнером или транспортным модулем. Для создания кадров фиксированной длины может применяться вставка выравнивающих бит. Временное мультиплексирование широко используется в цифровых сетях на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и в традиционных коаксиальных системах передачи. На рис. 3.3 показан механизм временного мультиплексирования.

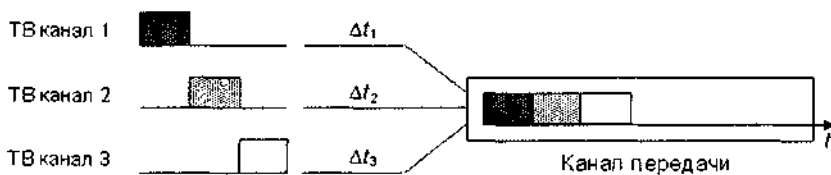


Рис. 3.3. Временное мультиплексирование (TDM)

Здесь, как и для модуляции, понятие *цифровое мультиплексирование* означает мультиплексирование цифровых сигналов. Смысл цифрового мультиплексирования заключается в том, чтобы объединить несколько отдельных импульсных потоков в один импульсный поток с большей скоростью, чем имел каждый из первоначальных потоков, т.е. получить более плотный цифровой поток и, тем самым, повысить эффективность использования канала передачи. Цифровое мультиплексирование является довольно распространенной технологией, применяемой, например, в цифровой телефонии, в которой все каналы начинаются и заканчиваются на центральной станции, что сильно упрощает синхронизацию.

Исключительно в волоконно-оптических системах используется метод мультиплексирования с разделением по длине волны, называемый также волновым мультиплексированием (Wave Division Multiplexing, WDM), который в настоящее время получил широкое распространение. Суть метода заключается в объединении нескольких оптических несущих с различными длинами волн λ_i и передаче суммарного сигнала по общему каналу с последующим выделением отдельных несущих путем их фильтрации на приемной стороне. Отдельные несущие генерируются оптическими источниками – лазерами. Волновое мультиплексирование подобно мультиплексированию с частотным разделением, но имеет существенное отличие, которое состоит в том, что модуляция, необходимая в FDM, здесь не используется, а сигналы просто объединяются с помощью оптического устройства в единый многочастотный сигнал. На рис. 3.4 показан механизм волнового мультиплексирования.

Волновой мультиплексор может быть реализован на основе интегральной оптики (с помощью дифракционной решетки из массива волноводов) или на основе традиционной миниатюрной дискретной оптики (трехмерный оптический мультиплексор, 3D Optics WDM). На рис. 3.5 показано устройство волнового демультиплексора на основе планарного оптического многопортового разветвителя с одним входным портом, группой выходных портов, расположенных симметрично относительно входного, и группой внутренних портов. Внутренние порты соединены через дифракционную решетку, образованную массивом

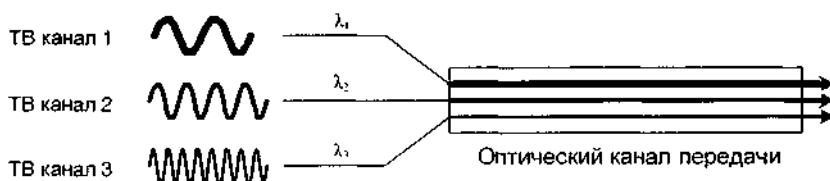


Рис. 3.4. Волновое мультиплексирование (WDM)

волноводов, с плоским отражающим зеркалом. Входной многочастотный сигнал подается в оптический волновод и распределяется по всем внутренним портам, откуда он распространяется по массиву световодов до зеркала с разным запаздыванием, отражается и подается со стороны внутренних портов в тот же волновод, где происходит интерференция входной и отраженных волн. Размеры, форма и расположение планарного разветвителя, решетки и выходных портов выбираются так, чтобы интерференционные максимумы световых волн располагались в точках выходных портов.

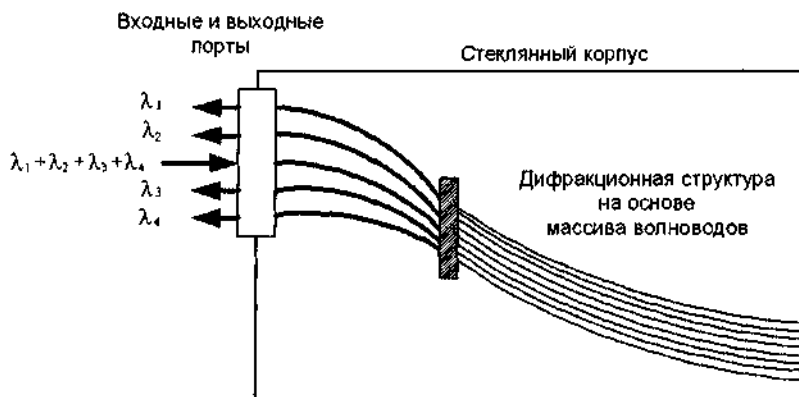


Рис. 3.5. Волновой мультиплексор/демультиплексор

Все элементы конструкции строго фиксированы в стеклянном блоке, что позволяет выдержать высокую точность изготовления этого устройства. Процедура мультиплексирования является обратной по отношению к рассмотренной процедуре демультиплексирования и выполняется тем же устройством, для которого входы и выходы меняются местами.

Технология WDM является относительно новой и дорогой, но уже стала очень популярной и распространенной. Для совместимости оборудования разных производителей систем WDM сектор стандартизации МСЭ выпустил рекомендацию ITU-T G.692.

Еще одним, менее распространенным пока, методом мультиплексирования, о котором нужно упомянуть, является так называемое мультиплексирование с кодовым разделением (Code Division Multiplexing, CDM). Это весьма конкурентоспособный и перспективный метод, позволяющий устройствам передавать информацию в одно и то же время в одной полосе частот и основанный на использовании широкополосного сигнала, полоса частот которого намного превышает полосу при FDM или TDM. Метод отличается высокой помехоустойчивостью, низкой мощностью передачи и, кроме того, защищенностью информации в физическом канале. Применяется он только при цифровой передаче.

3.4. Аналоговое телевидение

До тех пор, пока аналоговое телевизионное вещание будет дешевле цифрового, оно останется более распространенным и используемым. Аналоговым телевизионным сигналом называется сигнал, который повторяет распределе-

ние яркости на пути развертки изображения. Сигнал, состоящий из сигнала яркости, гасящих импульсов, и сигнала синхронизации, называется полным аналоговым телевизионным сигналом. Его типичная форма на интервале двух строк показана на рис. 3.6.

Для получения полного цветного телевизионного сигнала необходимо добавить информацию о цвете с помощью сумматора. Как уже говорилось, цвет добавляется в виде цветоразностных сигналов с сокращенной полосой частот на специальных цветовых поднесущих, расположенных в верхней части спектра сигнала яркости. Спектр сигнала яркости, получаемого путем линейно-строчной развертки, таков, что основная часть энергии сигнала сосредоточена около гармоник частоты строчной развертки, а между ними остаются свободные участки. Такой подход позволяет поместить сигналы цветности в остающиеся свободными участки спектра сигнала яркости. На рис. 3.7 схематично показан спектр телевизионного сигнала одного канала, занимающего полосу 8 МГц.

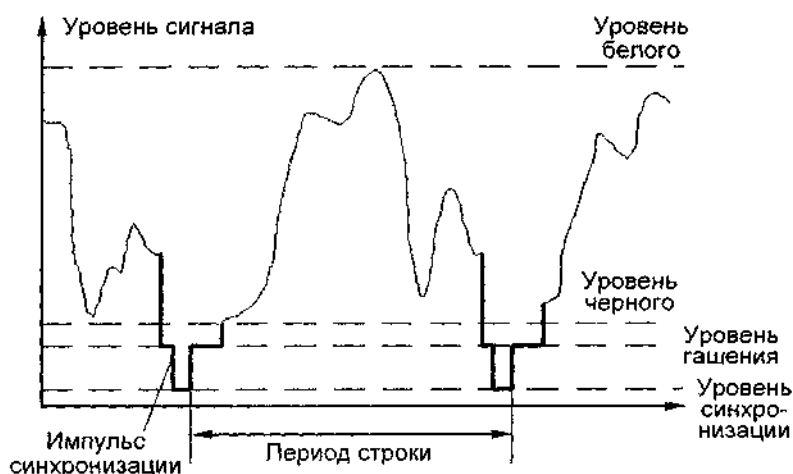


Рис. 3.6. Аналоговый телевизионный сигнал

В настоящее время в мире применяется три аналоговых стандарта цветного вещательного телевидения – PAL, SECAM, NTSC. Различие между этими стандартами заключается в основном в способе передачи цветовой информации, а также в некоторой разности частот в спектре сигнала. Стандарт PAL наиболее распространен в Западной Европе, стандарт NTSC используется в США и Канаде. В России с 1967 года и по сей день стандартом вещательного телевидения является система SECAM (от французского *Sequentiel Couleurs a Memoire* – последовательная передача цветов с запоминанием). Особенностью этой системы является то, что в каждой строке передается только один из двух цветоразностных сигналов, смешиваемых с сигналом яркости и поступающих в канал передачи поочередно. Поэтому получаемая четкость цветопередачи в два раза ниже, чем в других системах.

Не вдаваясь в подробности системы SECAM, приведем ее основные характеристики:

- модуляция цветоразностных сигналов – частотная;
- число строк в кадре – 625;

- частота строчной развертки – 15625 Гц;
- частота кадровой развертки – 50 Гц.

Поскольку большая часть телеканалов, передаваемых по российским сетям КТВ, принимается с западноевропейских спутников, необходимо учитывать проблему несовместимости разных ТВ стандартов. Стоит заметить, что в настоящее время почти все спутниковое вещание осуществляется в цифровом стандарте DVB (Digital Video Broadcasting), но некоторая часть каналов еще может передаваться в аналоговом стандарте PAL (Phase Alternation Line). Далеко не все операторы КТВ осуществляют преобразование в SECAM, поэтому можно сказать, что в российских кабельных сетях стандарт PAL используется наравне с официальным SECAM, являясь де-факто вторым стандартом.

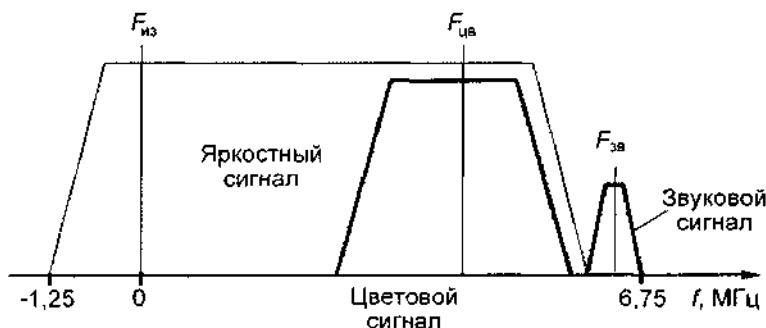


Рис. 3.7. Спектр аналогового телевизионного сигнала

Это стало возможным благодаря тому, что абонентские телевизионные приемники (опять же в большинстве западного производства) способны принимать телевизионные сигналы различных стандартов и самостоятельно их преобразовывать. Основные характеристики видеосигнала системы PAL совпадают с характеристиками системы SECAM за исключением передачи цветоразностных сигналов, для которой используется квадратурная балансная амплитудная модуляция с коммутацией фазы. Достоинствами системы PAL являются: уменьшение перекрестных искажений между сигналами яркости и цветности, отсутствие нарушений цветового тона (нет фазовых искажений), повышение отношения сигнал/шум за счет удвоения амплитуды сигналов цветности.

Сформированный таким образом полный цветной телевизионный сигнал любого из трех стандартов является исходным сигналом низкой частоты системы аналогового телевидения. Далее на головной телевизионной вещательной станции сигнал помещается в спектр выделенного для него телевизионного вещательного радиоканала (эфирного или кабельного) со своим каналом звукового сопровождения. Головная станция, будь то станция вещательной эфирной или кабельной сети, должна сформировать для передачи ТВ сигнала радиоканал с заданными характеристиками. Поскольку окончательными обслуживаемыми устройствами, как систем эфирного телевидения, так и систем КТВ, являются телевизионные приемники, имеющие строго нормированную частотную характеристику радиоканала, то передаваемые с эфирной или кабельной головной станции телевизионные сигналы должны соответствовать стандарту вещательного радиоканала.

Необходимо пояснить, что для формирования телевизионного вещательного радиоканала в мире существует несколько стандартов (всего 10). В международной классификации их принято обозначать латинскими буквами В, D, G, H, I, K, K1, L, M, N. Эти стандарты определяют такие характеристики радиоканала как занимаемая им полоса частот, значения частот несущих, вид модуляции несущей изображения, вид модуляции поднесущей звука и некоторые другие параметры. Радиоканал стандарта В занимает полосу 7 МГц, радиоканалы стандартов М и N занимают полосу 6 МГц, а радиоканалы всех остальных стандартов занимают полосу 8 МГц. Интервалы между несущими частотами изображения и звука и частоты цветowych поднесущих в этих стандартах различаются. Остаток нижней боковой полосы во всех стандартах равен 1,25 МГц. Стандарт D используется преимущественно в республиках бывшего СССР и в странах Восточной Европы. Стандарт В широко распространен в странах Западной Европы, а стандарт М используется в США, Канаде, Японии и в странах Южной Америки. Различные комбинации трех аналоговых стандартов формирования телевизионного сигнала со стандартами каналов телевизионного вещания образуют множество национальных телевизионных стандартов. В странах, входящих в организацию OIRT (Organization International Radio and Television), куда входит и Россия, действует стандарт SECAM D/K. В нем полоса частот видеосигнала составляет 6 МГц, разность между несущими частотами изображения и звука – 6,5 МГц, а полная полоса частот телевизионного канала – 8 МГц. Во всех стандартах телевизионного вещания используется амплитудная модуляция несущей изображения с частично подавленной нижней боковой полосой и частотная модуляция звуковой поднесущей.

На рис. 3.8 представлена укрупненная структурная схема передающего тракта головной станции, предназначенного для формирования сигналов изображения и звука одного ТВ канала.

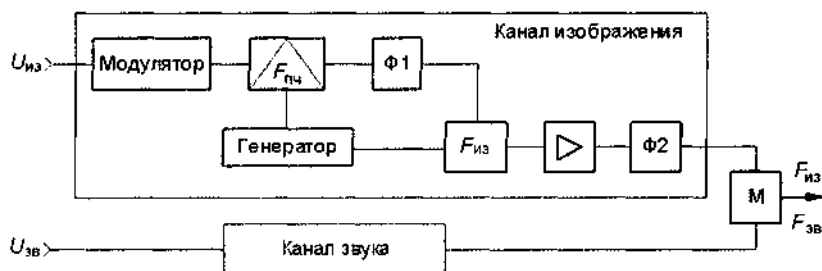


Рис. 3.8. Схема передающего тракта головной станции

Исходный низкочастотный видеосигнал поступает на модулятор. Синтезатор частот вырабатывает сигналы опорных частот для гетеродина с интервалом 8 МГц. Несущая частота сигнала изображения получается вычитанием промежуточной частоты из частоты гетеродина. В телевизионном вещании принято, что частота гетеродина расположена выше частоты несущей изображения на 38 МГц, т.е., промежуточная частота сигнала изображения составляет 38 МГц. На выходе модулятора получается двухполосный амплитудно-модулированный сигнал изображения. Полосовой фильтр $\Phi 1$ выделяет видеосигнал на промежуточной частоте, устраняя ненужные гармоники. Высокочастотный полосовой фильтр $\Phi 2$ формирует боковые полосы амплитудно-

модулированного сигнала. Звуковой радиосигнал формируется в отдельном канале аналогичным образом. Затем радиосигнал изображения усиливается и уже, будучи сформированным, поступает на мост сложения, где суммируется с радиосигналом звукового сопровождения. Разность уровней мощности радиосигналов изображения и звука должна составлять 10 дБ (т.е. мощность сигнала изображения больше мощности сигнала звука в 10 раз).

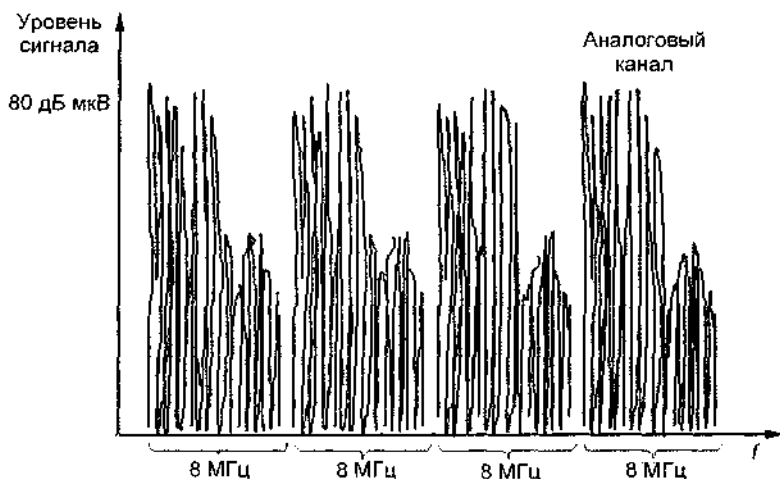


Рис. 3.9. Спектр группового аналогового сигнала

В соответствии с такой схемой в передающем тракте головной вещательной станции высокочастотная несущая модулируется исходным низкочастотным ТВ сигналом, перенося его тем самым на частоту определенного радиоканала. После этого сигналы всех радиоканалов поступают на устройство мультиплексирования (не показано на рис. 3.8), в котором образуется групповой телевизионный сигнал. При аналоговом телевизионном вещании, как правило, применяется частотное мультиплексирование. Спектр группового сигнала показан на рис. 3.9. В таком виде телевизионный сигнал поступает на передающую антенну (эфирной головной станции) или в распределительную широкополосную кабельную сеть.

3.5. Цифровое телевидение

Переход к цифровому телевизионному вещанию является в настоящее время важнейшей технической задачей в области телекоммуникаций. Решение этой задачи открывает новые возможности в предоставлении информационных услуг потребителям и дает огромные преимущества с точки зрения эффективности обработки и передачи информации. Для оператора это означает более эффективное использование пропускной способности эфирных, коаксиально-кабельных и волоконно-оптических линий связи, повышение помехозащищенности сигнала, увеличение дальности передачи, а также снижение энергопотребления телевизионной системы. Введение единого цифрового стандарта решает проблему несовместимости существующих аналоговых ТВ стандартов (PAL, SECAM, NTSC). Кроме того, внедрение цифрового телевидения упроща-

ет взаимодействие телевизионной сети с компьютерными информационными системами, создает возможность доступа в частные компьютерные сети и в глобальную сеть Internet. Пользователь при этом получает весьма ощутимые преимущества, среди которых высокое качество приема, интерактивность и многофункциональность системы, и возможность получения множества новых мультимедийных услуг. Цифровая телевизионная сеть может легко интегрироваться с другими цифровыми сетями, переносщими различные виды информации, образуя совместно с ними единое информационно-телекоммуникационное пространство.

Цифровым телевидением называется телевизионная технология, в которой получение, обработка и передача телевизионного сигнала связана с преобразованием его в цифровую форму. Основой для появления цифрового телевидения стало развитие сетевых концепций и технологий передачи и обработки информации. Прежде всего это касается использования в качестве среды для передачи сигналов волоконно-оптических линий связи с очень высокой скоростью передачи и малыми искажениями. Уже более десяти лет ВОЛС активно используется для передачи ТВ сигналов от студии до головных станций и от головных станций до магистральных усилителей. На телекоммуникационном рынке представлен широкий класс оборудования для таких сетей. В последние годы строительство волоконно-оптических сетей с цифровым методом передачи (как правило, на основе WDM) приобретает массовый характер. В связи с этим не менее актуальным вопросом становится экономически обоснованная модернизация уже существующих сетей с целью их использования для передачи цифровых сигналов. Другим фактором развития цифрового телевидения являются последние достижения в микроэлектронике и создание на их базе высокоскоростной аппаратуры для цифровой обработки сигнала.

В цифровой системе передача сигнала по каналу связи происходит только в цифровой форме. На передающей стороне системы цифрового телевидения сигнал быть преобразован из исходной аналоговой формы в цифровую или получен сразу в цифровом формате. По способу приема системы цифрового телевидения можно условно разделить на два вида. В одних системах используется преобразование сигнала из цифровой формы в аналоговую, а в других прием осуществляется сразу в цифровой форме без дополнительных преобразований. Определяющим фактором при этом является только способность телевизора декодировать цифровой сигнал.

Рассмотрим подробнее, как происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой для передачи по каналу и обратное ему восстановление аналогового сигнала из цифрового для его отображения аналоговым телевизионным приемником. Начнем с изучения процесса представления аналогового сигнала в цифровом виде. Как известно, аналоговые сигналы могут быть представлены непрерывными функциями времени, отображающими ход реальных физических процессов. По существу все процессы, происходящие в реальном мире, являются аналоговыми и описываются непрерывными функциями. Исходный телевизионный сигнал также является аналоговым, поскольку, как уже было сказано, он повторяет распределение яркости на пути развертки изображения. Цифровой сигнал отличается от аналогового тем, что он, во-первых, по своей форме не повторяет ход реального процесса, а, во-вторых, является дискретной функцией времени. Следовательно, для получения цифрового сигнала необходимо выполнить преобразование аналогового сигнала в цифровой поток

некоторых дискретных значений. Эту процедуру называют аналого-цифровым преобразованием. Обычно ее представляют в виде последовательности трех операций: дискретизации, квантования и кодирования. Следует иметь в виду, что это деление довольно условно. В литературе по системам цифровой связи аналогово-цифровое преобразование иногда называют дискретной модуляцией, операции дискретизации и квантования представляют как одну операцию оцифровывания сигнала, а кодирование часто называют цифровой модуляцией. Однако здесь будем придерживаться первой терминологии. Все три операции выполняет аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). На выходе АЦП получаем сигнал, представляющий собой поток импульсов, следующих друг за другом с некоторой тактовой частотой или скоростью, которая определяется частотой дискретизации аналогового сигнала и числом квантованных значений его амплитуды и называется битовой скоростью. Сигнал, поступающий с выхода АЦП, имеет только два распознаваемых состояния: одно условно определяется как низкое, а второе условно определяется как высокое. Эти состояния в цифровой технике называются соответственно логическим нулем "0" и логической единицей "1", а вместе двоичными символами или битами. Таким образом, нулю соответствует импульс с низким уровнем, а единице соответствует импульс с высоким уровнем.

Операция дискретизации заключается в выборке в определенные моменты времени отдельных (дискретных) значений непрерывного аналогового сигнала, называемых отсчетами. Промежуток времени, через который выбираются значения, называется интервалом дискретизации. Наиболее часто используется равномерная дискретизация, при которой отсчеты выбираются периодически, т.е. с фиксированным интервалом дискретизации T_D . Метод равномерной дискретизации основан на теореме Котельникова-Найквиста, согласно которой для восстановления непрерывного сигнала (с ограниченным спектром) по его отсчетам достаточно выполнить дискретизацию с интервалом, удовлетворяющим условию:

$$T_D \leq \frac{1}{2F_B},$$

где F_B – верхняя граничная частота спектра аналогового сигнала.

Величина, обратная интервалу дискретизации, называется частотой дискретизации $F_D = 1/T_D$. Следовательно, справедливо также: $F_D \geq 2F_B$.

Практическая ценность теоремы о дискретизации состоит в том, что она позволяет определить, какую частоту дискретизации нужно взять для правильного восстановления непрерывного сигнала по его дискретным значениям. Способ восстановления непрерывного сигнала заключается в интерполяции значений сигнала между его отсчетами с помощью фильтра низких частот. При этом частоту дискретизации сигнала следует выбирать несколько выше удвоенной верхней частоты спектра исходного сигнала. При меньшей частоте дискретизации возникает наложение частот, и правильная интерполяция становится невозможной. В то же время слишком частая выборка отсчетов сигнала вызывает появление сильно коррелированных отсчетов, которые содержат избыточную информации, снижающую эффективность передачи. Поэтому желательно выбирать такой темп дискретизации, при котором ошибка восстановления сигнала соответствует заданной погрешности. Например, при линейной

интерполяции величину частоты дискретизации, соответствующую допустимой погрешности восстановления сигнала, можно оценить по формуле:

$$F_D \geq \frac{2,2}{\sqrt{\delta}} F_B,$$

где δ – допустимая относительная погрешность восстановления.

Следующая операция – квантование – состоит в считывании мгновенных значений амплитуды сигнала (отсчетов) в выбранные моменты дискретизации с заданной точностью. Суть квантования заключается в разбиении всего динамического диапазона исходного сигнала на конечное число фиксированных уровней и привязке отсчетов сигнала к этим уровням. Привязка означает, что амплитуда каждого отсчета округляется до амплитуды ближайшего уровня. Таким образом, цифровой сигнал будет состоять не из точных значений отсчетов, а из приближенных. Разность между соседними уровнями квантования называется шагом квантования. Квантование может быть линейным (с постоянным шагом) и нелинейным (с изменяющимся шагом). Количество уровней квантования должно быть достаточно большим, чтобы глаз не различал градаций амплитуды сигнала яркости, но в то же время слишком большое количество уровней также приводит к избыточности информации. Поскольку после операции квантования цифровой сигнал будет состоять не из самих отсчетов, а из их приближенных значений, то в любом случае будет иметь место ошибка квантования, возникающая при округлении. Эта ошибка еще называется шумом квантования. Однако, чувствительность глаза к изменению яркости ограничена, поэтому некоторый шум квантования в изображении допустим. Считается, что шум квантования перестает восприниматься, когда число уровней превышает 200.

Хотя результатом этих двух операций уже является цифровой сигнал, передавать его в таком виде по каналу связи нельзя, поскольку по своей помехоустойчивости он слабо выигрывает по сравнению с исходным аналоговым сигналом. Для повышения помехозащищенности сигнала выполняется следующая операция, которая называется кодированием. Кодирование состоит в представлении дискретных квантованных значений сигнала, полученных на предыдущих этапах, в виде двоичных кодовых комбинаций, состоящих только из двоичных символов (битов). В настоящее время наиболее распространенным методом представления квантованного сигнала в двоичном коде является импульсно-кодовая модуляция, ИКМ (Pulse Code Modulation, PCM). Кодирование методом ИКМ предполагает, что длины всех кодовых комбинаций равны, т.е. каждый отсчет кодируется одинаковым количеством бит. Поскольку кодирование основано на представлении любого значения амплитуды квантованного сигнала в двоичной системе счисления, то количество уровней квантования M на предыдущем шаге должно быть выбрано равным k -ой степени числа 2. При этом k – есть ни что иное, как длина кодовой комбинации. Обычно k берется равным 7 или 8. Экспериментально установлено, что для передачи изображения с отличным качеством достаточно $256=2^8$ уровней. Таким образом, на этой стадии происходит представление отдельных или дискретных значений аналогового сигнала (например, строго квантованных значений напряжения сигнала) определенными последовательностями или комбинациями битов. В теории кодирования битовый сигнал, получаемый после этой операции, называется цифровым сигналом с потенциальным кодом без возвращения к нулю (NRZ).

Метод ИКМ был разработан Риверсом еще в 30-е годы, но в телевизионной технике он стал применяться гораздо позже, так как требовал очень высокого быстродействия электронных устройств преобразования сигнала. Это требование вытекает из того, что телевизионное изображение необходимо передавать в реальном времени, без задержек. Следовательно, для прямой передачи изображения кодовые комбинации нужно создавать с частотой, равной частоте дискретизации. Поэтому понятия “кодируется” и “передается” здесь используются наравне. В цифровой технике вместо частоты используется понятие скорости передачи. Скорость передачи цифрового сигнала измеряется числом переданных двоичных символов в секунду, т.е. имеет размерность бит/с. Следовательно, скорость передачи цифрового телевизионного сигнала C должна определяться соотношением:

$$C = F_D k,$$

где $k = \log_2 M$ – длина кодовой комбинации (в битах); F_D – частота дискретизации исходного видеосигнала, Гц.

Битовая скорость передачи является важнейшей характеристикой цифрового сигнала, подобно полосе частот аналогового сигнала. Данное соотношение раскрывает физический смысл скорости передачи. Оно показывает, что чем больше уровней квантования используется при аналого-цифровом преобразовании, тем более длинной битовой комбинацией кодируется каждый уровень, и, тем большая скорость требуется для его передачи цифрового сигнала по каналу связи. Иначе говоря, чем выше качество цифрового сигнала, тем дороже станет передать его по каналу.

Вычислим скорость, необходимую для передачи телевизионного сигнала. Верхняя граничная частота спектра видеосигнала яркости составляет 6 МГц. Согласно теореме Котельникова-Найквиста минимальная частота дискретизации должна быть равна 12 МГц. Для получения более качественного сигнала ее берут равной 13,5 МГц (эта частота является стандартной для цифрового ТВ). Тогда, при длине кодовой комбинации, равной 8, скорость цифрового потока видео составит:

$$C \approx 13,5 \cdot 8 = 108 \text{ Мбит/с.}$$

После добавления информации о цвете скорость потока увеличится. Поскольку цвет передается в сокращенной полосе частот, то для передачи обоих цветоразностных сигналов используют в два раза меньшую частоту дискретизации, равную 6,75 МГц. В этом случае полная скорость цифрового потока видео составит:

$$C = 108 \text{ Мбит/с} + 2 \cdot 6,75 \cdot 8 = 216 \text{ Мбит/с.}$$

В цифровом телевидении существуют и другие форматы кодирования, для которых частоты дискретизации и, соответственно, качество получаемого сигнала различаются. Различие этих форматов не нарушает их совместимости, поскольку все возможные частоты дискретизации кратны основной частоте 13,5 МГц и переход от одного формата к другому заключается в простом отбрасывании ненужных промежуточных отсчетов или, наоборот, их считывании. На современных телецентрах используются три уровня качества: высшее (студийное), промежуточное и низшее (используется для видеожурналистики). Для

получения сигнала студийного качества оба цветоразностных сигнала кодируются с частотой дискретизации 13.5 МГц, т.е. в полной полосе частот. Полная скорость цифрового потока видео в таком формате составляет 324 Мбит/с.

Разумеется, передавать по каналу цифровой поток с такой высокой скоростью весьма затруднительно. Это потребовало бы не только высокого быстродействия устройств преобразования сигнала, но и полосы канала, большей, чем при аналоговой передаче. Поэтому после процедуры АЦП необходимо уменьшить скорость цифрового потока до приемлемых значений. Эта операция называется сжатием цифрового сигнала. Технология сжатия основана на устранении избыточности, имеющейся в телевизионном сигнале. Избыточность в видеосигнале означает наличие в нем корреляции (зависимости) между соседними элементами изображения. Дело здесь в том, что яркость элемента меняется не скачкообразно, а подчиняясь определенным статистическим законам, поэтому яркость пропущенного элемента можно предсказать по значению яркости соседнего с ним элемента. Неподвижные элементы изображения также можно не передавать повторно. При этом качество изображения не должно страдать. Эти принципы были реализованы в стандарте MPEG-2, разработанном специально для сжатия сигналов ТВ вещания в 1994 г. Он предусматривает многоканальное кодирование звука и кодирование изображения, совместимое со стандартом записи видео на компакт-диски MPEG-1. Стандарт позволяет получить цифровой телевизионный сигнал, несущий информацию 576 активных строк в кадре и 720 отсчетов в строке, и, имеющий скорость передачи от 3 до 10 Мбит/с, в зависимости от требуемого качества изображения. Согласно Рекомендации МККР-601, для получения изображения студийного качества достаточно передавать сигнал со скоростью 9 Мбит/с, а для получения бытового качества достаточно скорости 4 – 6 Мбит/с.

Полученный после АЦП и кодера MPEG цифровой сигнал подвергают еще одной операции кодирования, которая называется кодированием канала, поскольку в нем не была предусмотрена защита от помех, возникающих в канале связи. Помехи в канале приводят к неправильному распознаванию символов приемным устройством, т.е. к возникновению ошибок при передаче. Для борьбы с помехами используется помехоустойчивое кодирование, основанное на введении в кодовые комбинации дополнительных (проверочных) бит. Смысл добавления этих бит заключается в коррекции ошибок, т.е. в восстановлении утерянных бит. В результате цифровой поток требует уже несколько большей скорости передачи, поскольку на передачу проверочных бит необходимо затратить какое-то время.

Подчеркнем, что цифровой сигнал является лишь отображением, с той или иной степенью точности, аналогового сигнала и требует в конечном итоге обратного преобразования в аналоговую форму. Однако, в некоторых случаях сам цифровой сигнал является первичным и не требует конечного преобразования в аналоговый. К таковым относятся сигналы, которыми обмениваются компьютеры, или видеоданные, записанные на носитель в цифровом виде. Некоторые модели цифровых телевизоров последнего поколения не преобразовывают цифровой сигнал в аналоговую форму для воспроизведения изображения. Однако, классическую схему процесса восстановления сигнала на приеме можно представить в виде трех последовательных процедур – демодуляции, декодирования и цифро-аналогового преобразования (ЦАП). Эти операции являются обратными по отношению ко всем операциям передачи сигнала, опи-

санним выше. Операция ЦАП представляет собой операцию, обратную АЦП, включая все ее стадии.

Цифровое вещание организовано следующим образом. На головной станции цифровые сигналы, которые нужно передать, кодируются кодерами MPEG, после чего они поступают на мультиплексор, собирающий сигналы в один цифровой поток со скоростью, равной сумме скоростей всех сигналов. Пропускная способность канала, измеряемая также в бит/с, должна превышать скорость цифрового потока. Затем этот поток необходимо преобразовать в форму, пригодную для передачи по каналу, т.е. подвергнуть его цифровой модуляции. В цифровом ТВ вещании применяется два метода модуляции – квадратурно-фазовая манипуляция QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) и квадратурно-амплитудная модуляция QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Суть этих методов одинакова: биты передаются путем скачкообразного изменения фазы синусоидального несущего колебания постоянной частоты. Однако, в методе QPSK амплитуда сигнала остается неизменной, а в методе QAM амплитуда меняется с целью увеличения информативности передаваемого сигнала. Очевидно, метод QPSK характеризуется большей помехозащищенностью, но меньшей скоростью передачи, чем QAM. Поэтому QPSK используется в основном в каналах плохого качества, например, в каналах спутникового вещания.

В кабельном телевидении, где можно достигнуть гораздо большего отношения сигнал/шум, применяется QAM, что значительно повышает пропускную способность цифрового канала. Это дает ощутимую экономию занимаемой полосы частот. Существует несколько типов модуляции QAM: QAM-16, QAM-32, QAM-64 и другие. Они различаются количеством используемых уровней амплитуды в передаваемом сигнале а, следовательно, скоростью передачи и помехоустойчивостью. Из перечисленных типов наибольшую помехоустойчивость имеет QAM-16, а наименьшую – QAM-64, поскольку, чем большим количеством уровней передается сигнал, тем труднее их различить на приеме в результате действия искажений в канале. Аналогично количеству уровней квантования, количество уровней QAM определяется целой степенью числа 2. Суть методов квадратурной модуляции можно пояснить с помощью фазово-амплитудных диаграмм, показанных на рис. 3.10. По ним видно, что в модуляции QPSK используется только два уровня сигнала (нулевой и ненулевой), при QAM-16 используется уже 4 уровня сигнала, а, например, при QAM-64 будет использоваться 8 уровней.

В Европе в рамках проекта Digital Video Broadcasting (DVB) был разработан комплекс стандартов для различных систем цифрового телевизионного вещания. Среди них DVB-T (эфирное цифровое ТВ), DVB-S (спутниковое цифровое ТВ) и DVB-C (кабельное цифровое ТВ). Все эти стандарты опираются на рекомендации МСЭ. В основу цифровой обработки изображения и звука положены алгоритмы, описанные стандартом MPEG-2. Стандарт DVB-C (EN 300 429), а также рекомендация ITU-T J.83 определяют кадровую структуру, кодирование и модуляцию в распределительных кабельных сетях. В прямом канале предусмотрено применение квадратурно-амплитудной модуляции QAM-64 как оптимальной, что позволяет в канале с полосой пропускания 8 МГц обеспечить передачу информации со скоростью до 41,34 Мбит/с. Полезная скорость передачи цифрового потока при этом составляет 38,1 Мбит/с, что дает возможность передать до 8 ТВ программ. В обратном канале цифровые потоки модулируются методом QPSK.

При использовании QAM-32 или QAM-64 приемные устройства должны обеспечивать работу во всей полосе прямого канала 47 – 1000 МГц при входной чувствительности -57...-80 дБ-мкВ. Для повышения помехоустойчивости передачи используется систематический код Рида-Соломона с параметрами (204,188,8). Первый параметр (204 бит) обозначает полную длину кодовой последовательности, второй (188 бит) – длину полезной информационной последовательности, а третий параметр (8 бит) – количество бит в одном пакете, гарантированно исправляемых кодом. Для возможности исправления к каждому пакету MPEG-2 добавляется 16 проверочных бит. Оптимальный вариант используемого кодирования подбирается исходя из параметров качества кабельной сети, поэтому современное оборудование позволяет расширить выбор вариантов кодирования.

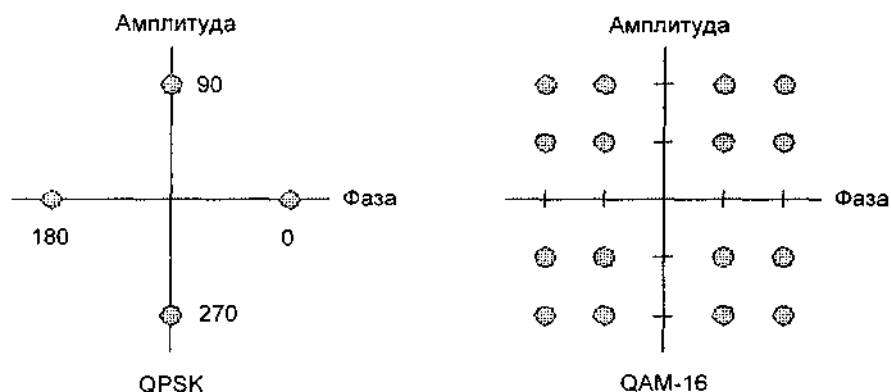


Рис. 3.10. Модуляция QPSK и QAM

Для того, чтобы улучшить вероятность BER (или отношение C/N) можно повысить мощность сигнала, однако это вызывает другие паразитные эффекты, например проникновение сигнала на вход телеприёмника, помехи вследствие наличия второй и третьей гармоник от сигнала обратного канала оборудования передачи данных. Пассивное распределительное оборудование, в зависимости от качества, имеет развязку до 45 дБ между абонентскими выходами и накладывает некоторые требования на мощность обратного канала. При необходимости перевода цифровых пакетов из стандартов DVB-T и DVB-S в стандарт DVB-C используются специальные трансмодуляторы.

Благодаря более высокой помехоустойчивости цифровой модуляции, цифровые сигналы требуют на приеме менее высокого отношения мощности сигнала к мощности шума и, следовательно, могут передаваться с меньшим уровнем и на более высоких частотах, чем аналоговые сигналы. Стандартом DVB-C определено, что уровни цифровых сигналов должны быть на 10 дБ ниже уровней аналоговых сигналов и их передача осуществляется в полосе частот выше 600 МГц. На рис. 3.11 показан спектр группового цифрового сигнала.

В России пока ведется лишь экспериментальное цифровое вещание. В 2001 г. было построено несколько опытных станций для апробирования этой технологии. Достаточно развито только спутниковое цифровое вещание. Особенно стоит отметить проект «НТВ+», в рамках которого была создана спутниковая система ТВ вещания, рассчитанная на широкого потребителя.

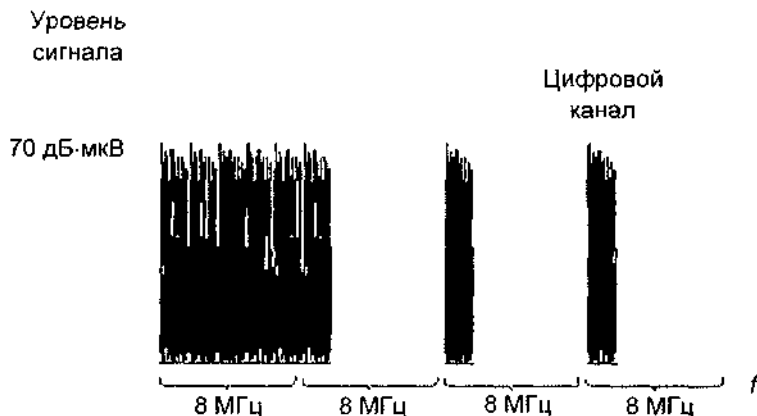


Рис. 3.11. Спектр группового цифрового сигнала

Цифровые спутниковые ресиверы “НТВ+” и малогабаритные приемные тарелки выпускаются серийно и имеют приемлемую для частного абонента стоимость.

3.6. Качество передачи

Качество воспроизведения телевизионного сигнала (качество изображения) является главным критерием эффективности и работоспособности кабельной сети. Разумеется, абсолютно точное воспроизведение оригинального изображения на экране телевизора невозможно, поэтому задачей системы КТВ является воспроизведение изображения с наименьшими потерями качества. Качество изображения является комплексной характеристикой, определяемой многими показателями. Прежде всего, качество изображения ограничено в принципе техническими характеристиками используемой системы цветного телевидения, такими как разрешающая способность электронно-оптического оборудования, число строк, частота кадров, динамический диапазон изменения яркости, диапазон отображаемых цветов и другими. Эти показатели, установленные ГОСТ 7845-92, определяют номинальное качество телевизионного изображения. Получить на приеме более высокое качество изображения, чем номинальное, невозможно. Во-вторых, фактическое ухудшение качества изображения определяется отклонением показателей системы передачи от нормативных значений или, проще говоря, качеством передачи. Обобщая, можно сказать, что качество изображения складывается из качества формирования (восстановления) телевизионного сигнала и качества передачи.

Все причины ухудшения качества передачи можно безусловно разделить на три типа по механизму появления и действия на систему. К первому типу относятся линейные искажения. Линейные искажения возникают вследствие естественного затухания и задержки сигналов и при передаче по длинному кабелю, когда величины затухания и величины задержки оказываются различными для сигналов разных частот. Эти различия отражаются в неравномерности характеристики усиления (или потерь) системы передачи в пределах полосы частот, а также в неравенства задержек между сигналами яркости и цветности в одиночном телевизионном сигнале. Особенность линейных искажений в том,

что они не порождают новых частотных составляющих. Ко второму типу относятся нелинейные искажения, которые называют также интермодуляционными. Они возникают в результате взаимодействия нескольких сигналов в разных точках передающего тракта системы КТВ и, что очень важно, их признаком является появление новых гармонических составляющих на других частотах в пределах полосы передачи. К третьему типу относятся шумы разного происхождения.

Шумы могут иметь внешнее происхождение (наведенные электромагнитные помехи в спектре передачи) и возникать внутри кабельной системы (в основном, тепловой шум активных устройств). И шумы, и искажения могут возрастать как в процессе обработки телевизионного сигнала на передающей стороне, так и в канале передачи. Первое более важно с точки зрения правильного выбора головной станции, а второе – с точки зрения грамотного построения распределительной кабельной сети и выбора усилителей. В конечном итоге шумы и искажения обнаруживаются на экране телевизионного приемника.

Заметим, что в аналоговом и цифровом телевидении качество передачи оценивается по-разному. В аналоговых системах учитываются показатели линейных искажений, которыми служат неравномерность АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) и величина канального ГВЗ (группового времени задержки) и показатели нелинейных искажений, которыми являются СТВ (Composite Triple Beat), CSO (Composite Second Order) и XM (Cross Modulation). Основным показателем шума в аналоговых системах является отношение несущая/шум C/N (Carrier/Noise). Качество передачи в аналоговых системах можно контролировать с помощью передачи испытательных строк во время обратного хода луча, т.е. в кадровом гасящем импульсе. Испытательные сигналы, передаваемые в этих строках, представляют собой серию синусоидальных колебаний разных частот, предназначенных для контроля амплитудно-частотной характеристики канала во всей полосе частот. По результатам измерений испытательных сигналов судят о возникающих искажениях.

Качество передачи в системах цифрового телевидения оценивается в основном тремя показателями. Это вероятность ошибочного приема бита (Bit Error Rate, BER), джиттер (дрожание) времени задержки передачи бита ($D(tz)$) и время задержки при передаче бита (tz). Под задержкой подразумевается время, за которое бит проходит сеть от отправителя к получателю. Общая задержка в цифровой сети складывается из времени оцифровки, сжатия, передачи по каналу и обработки в промежуточных узлах. Джиттер времени задержки или фазовое дрожание – это разность во времени передачи по сети отдельных символов цифрового сигнала. Джиттер характеризует нестабильность задержки при передаче двоичных символов, которая, накапливаясь, может приводить к возрастанию уровня флуктуационных и периодических помех, а в результате – к искажениям цветопередачи и вертикальным разрывам изображения. Чем сильнее различаются задержки при передаче отдельных символов, тем больше джиттер. В сетях, ориентированных на пакетную передачу, где биты группируются в пакеты, кроме этих показателей учитывается еще вероятность ошибочного приема пакета (Package Error Rate, PER), вероятность потери пакета (Packet Loss Rate, PLR) и задержка пакета. Все названные показатели должны публиковаться в спецификациях приборов или рассчитываться разработчиком для наихудшего случая (максимального количества каналов и максимальных уровней передачи и максимальной области обслуживания).

В аналоговом телевидении шумы могут проявляться в виде “снега” или полос на изображении. Наиболее заметны периодические помехи, частота которых не кратна частоте телевизионной развертки и находится в полосе принимаемого канала. Причиной могут быть любые внешние источники электромагнитного излучения, промышленные или бытовые. Периодическая помеха, наведенная на высококачественном кабеле внешним источником, попадает на антенный вход телевизора и проявляется в виде движущихся по экрану полос или сетки. Импульсные помехи в виде точек или штрихов могут возникать в результате атмосферных явлений и работы электрооборудования. Самыми серьезными являются в кабельных сетях флуктуационные помехи, причиной которых является тепловой шум любого электронного устройства, проявляются в виде мелких точек. Сетевые помехи с частотой сети и ее гармоник проявляются в виде полос. Из-за рассогласования линии связи или приема наряду с прямым сигналом отраженного сигнала (эха) возникают искажения в виде окантовки или многочисленных контуров. Линейные и нелинейные искажения имеют большое количество разнообразных проявлений, среди которых геометрические искажения, искажения цветового тона, четкости, резкости и яркости мелких деталей изображения. Нарушение геометрических пропорций элементов изображения называется геометрическим искажением. Оно появляется из-за разницы скоростей строчной и кадровой разверток на приеме и передаче. Полутонное или градационное искажение возникает из-за уменьшения динамического диапазона яркости и проявляется в нарушении передачи контраста предметов. Цветовые искажения возникают из-за различных эффектов в фотоэлектрических преобразователях свет-сигнал и сигнал-свет. Для устранения линейных искажений в телевидении успешно применяются различные методики коррекции, основанные на преднамеренном введении в сигнал искажений обратного характера на передающей стороне. Борьба с нелинейными искажениями представляет собой более трудную задачу, поскольку она связана с ограничением уровня паразитных гармонических составляющих, находящихся в спектре передаваемых сигналов. Обычными требованиями к качеству передачи в аналоговых системах являются отношение C/N не менее 43 дБ и показатели СТВ и CSO не менее 54 дБ.

В цифровом телевидении искажения возникают из-за шумов квантования в АЦП, нестабильности частоты дискретизации и искажения формы импульса. Шумом квантования называется разность между точным значением сигнала и его квантованным (приближенным) значением. При малом количестве уровней квантования (менее 2^7) на изображении появляются искажения в виде дополнительных контуров, сетки или цветной бахромы, плавные яркостные переходы превращаются в ступенчатые. Искажения, связанные с дискретизацией сигнала во времени, могут проявляться как паразитная амплитудная и фазовая модуляция. Специфические искажения формы импульсов, связанные с использованием ВОЛС (дисперсия), приводит к ошибкам при передаче символов и неверному восстановлению сигналов приемником. Это может выражаться в распаде или разложении изображения на отдельные укрупненные прямоугольные элементы, “дрожание” звука и в других эффектах. Требования к качеству передачи различаются в соответствии с классификацией служб, принятой в цифровых системах. Специфические искажения возникают при кодировании и сжатии изображений по стандарту MPEG-2. Искажения обусловлены межкадровым кодированием Р-кадров с предсказанием движения назад по времени и В-кадров с анализом движения макроблоков размером 16×16 пиксел в двух кадрах в обе стороны по вре-

мени. Стандартные измерительные сигналы не всегда подходят для анализа искажений в телевизионном канале, включающем аналого-цифровые звенья, особенно, если в состав оборудования входят кодирующие (декодирующие) устройства стандарта SECAM. Требуется использовать модифицированные измерительные сигналы, которые позволяют обеспечить адекватный анализ характеристик звеньев типа SECAM-MPEG-2-SECAM и PAL-MPEG-2-SECAM.

Все службы в сфере цифровые технологий передачи согласно рекомендации CC MCЭ I.211 делятся на интерактивные и распределительные. Интерактивные службы подразделяются на диалоговые службы реального масштаба времени (телефония, видеотелефония, мониторинг) и информационно-поисковые службы (поиск информации по запросу, обмен данными). Распределительные службы подразделяются на службы с управлением со стороны пользователя и без управления со стороны пользователя. Диалоговые службы весьма критичны к времени задержки и, особенно, к джиттеру времени задержки при передаче бита. Например, для речевого сигнала в телефонии задержка не должна превышать 200 мс. Экспериментально установлено, что задержка менее 200 мс почти не воспринимается на слух, но если задержка превышает 500 мс, то речь становится неразборчивой. При большом джиттере в речи появится так называемое проскальзывание и треск. Джиттер устраняют путем включения в приемную часть буфера, который "выравнивает" исходную последовательность символов по времени прихода. Распределительные службы, к которым относится ТВ вещание, критичны к джиттеру задержки, но гораздо менее чувствительны к времени задержки. Показатель BER важен в пределах тех значений, при которых потери в потоке видео или звука будут не слишком заметны для абонента. Для информационно-поисковых служб показатель BER является более существенным, а требования к времени и джиттеру задержки менее строгими. Поэтому в цифровом телевидении обычно ограничиваются двумя наиболее важными показателями – вероятностью BER и джиттером времени задержки. Однако, если говорим о предоставлении в телевизионной кабельной сети в качестве дополнительных услуг телефонии и передачи данных по запросу, то значимыми становятся все три показателя. По результатам европейского исследовательского центра в области телекоммуникаций (Research on Advanced Communication in Europe, RACE) для ТВ вещания величина BER должна составлять не более 10^{-6} . Более высокое значение BER приведет к потере отдельных элементов изображения или его разложению (для сравнения, допустимое при передаче данных значение BER составляет 10^{-7}). Стандарт DVB-C предусматривает, что величина BER должна находиться в пределах от 10^{-6} до 10^{-11} , причем значение 10^{-11} характеризуется как практически идеальное.

Так как конечным потребителем видеoinформации является зритель, более или менее верная оценка качества передачи может быть получена лишь путем усреднения субъективных оценок, данных множеством зрителей. Методику субъективной оценки качества изображения по сравнительной шкале ухудшения регламентирует ГОСТ 18198 и рекомендация CCIR 500, согласно которому тестирование изображения проводится на экране контрольного телевизора с диагональю экрана не менее 50 см, подключенного к входу первой абонентской розетки любой абонентской линии. Тесты проводят не менее чем с десятью зрителями, не имеющими специальной подготовки. В качестве испытательных изображений могут использоваться специальные изображения, исключая испытательные таблицы, и реальные сюжеты. Условия проведения наблюдения изображения приведены в табл. 3.1.

Условия наблюдения телевизионного изображения

Условия наблюдения	Норма
Отношение расстояния наблюдения к высоте изображения на экране	6
Максимальная яркость свечения экрана, кд/м ²	70 ±10
Отношение яркости выключенного (погашенного) кинескопа к максимальной яркости на экране, не более	0,02
Отношение яркости фона позади телевизора к максимальной яркости изображения	≈ 0,1
Постороннее освещение помещения	Низкое
Цвет заднего фона	Белый
Отношение телесного угла, под которым видна часть заднего фона, удовлетворяющая приведенным требованиям, к углу, под которым видно изображение, не менее	9

По результатам наблюдения все наблюдатели выставляют оценки. Качество изображения оценивают по пятибалльной шкале МСЭ-Р в соответствии с табл. 3.2. Затем рассчитывают среднюю оценку качества как среднее арифметическое оценок отдельных наблюдателей с точностью до 0,25 балла, исключив оценки, отличающиеся от средней на два балла и более.

Таблица 3.2

Пятибалльная шкала оценки качества

Оценка (балл)	Качество	Ухудшение
5	Отличное	Незаметное
4	Хорошее	Заметное, но не мешающее
3	Удовлетворительное	Слегка мешающее
2	Плохое	Мешающее
1	Очень плохое	Сильно мешающее

Таблица 3.3

Соотношение субъективных оценок качества изображения на входе и выходе распределительной сети

<i>При допустимом снижении оценки на 1,0 балл</i>			
Средняя оценка качества изображения на входе РС, баллы	4,00	4,50	5,00
Средняя оценка качества изображения на выходе РС, баллы, не менее	3,50	3,75	4,0
<i>При допустимом снижении оценки на 0,5 балла</i>			
Средняя оценка качества изображения на входе РС, баллы	4,00	4,50	5,00
Средняя оценка качества изображения на выходе РС, баллы	3,75	4,25	4,50

Испытания проводят на входе кабельной распределительной сети (КРС), на выходе головной станции и, выборочно, на абонентских розетках, домовой распределительной сети. Соответствие полученных оценок качества требуемым нормам определяют с помощью табл. 3.3, в которой приведены субъективные оценки изображений на входе и выходах распределительной сети при допустимом снижении субъективной оценки качества изображения на 1,0 балл и 0,5 балла. При оценке качества телевизионного изображения на входе кабельной распределительной сети меньше 4 баллов испытания не проводят.

В последующих главах все виды искажений в кабельных системах, механизмы их возникновения и накопления, способы их измерения и ограничения будут рассмотрены более подробно. Отдельная глава будет посвящена единицам измерения этих показателей.

3.7. Распределение частот телевизионного вещания

Любая головная телевизионная станция формирует радиоканалы как аналогового, так и цифрового ТВ вещания не произвольно, а в соответствии со стандартным распределением частот телевизионного вещания. На рис. 3.12 в обобщенном виде изображен радиоспектр частот телевизионного вещания в кабельной сети. В телевизионном вещании используются мые (МВ) и дециметровые (ДМВ) волны, которые соответствуют диапазону очень высоких частот ОВЧ (VHF и UHF). Этот же спектр, но укороченный примерно до 400 МГц, используется и в эфирном вещании. Показанная на рисунке верхняя граница спектра соответствует активно используемому в настоящее время диапазону 5 – 862 МГц, хотя ГОСТ Р52023-2003 разрешает использование частот до 1000 МГц, а EN-50083 уже сейчас предусматривает возможность использования для телевещания частот до 1750 МГц. Дебаты по поводу верхней границы частотного диапазона в системах кабельного телевидения в настоящее время несколько утратили свою актуальность в связи с появлением цифрового телевидения, технология которого позволяет разместить до 8 телевизионных программ в растре одного аналогового канала 8 МГц.

В табл. 3.4 приведено подробное распределение частот телевизионного вещания в диапазоне прямого направления передачи (downstream) 47 – 862 МГц в соответствии с частотной сеткой OIRT. Номер каждого радиоканала однозначно определяет несущие частоты сигналов изображения и звука. Как видно из таблицы, весь радиоспектр разбит на 8 диапазонов, обозначенных наименованиями с римскими цифрами. В диапазонах размещены телевизионные радиоканалы разных типов, отличающиеся обозначением и нумерацией. Среди них R-каналы, СК-каналы, S-каналы и k-каналы. В зарубежной терминологии диапазоны МВ-I + МВ-II называются Low VHF, диапазон МВ-III называется High VHF, а диапазоны КАТВ-II + Hyperband + ДМВ-IV называются UHF.

В мом диапазоне МВ-I (48,5 – 84 МГц) находится 3 канала, используемых в основном в КСКПТ для трансляции основных эфирных каналов, причем, частоты 66 – 76 МГц отведены для звукового ЧМ-вещания. Качество передачи в этих каналах может ухудшаться из-за отклонения частотных характеристик усилителей на границе диапазона. Канал R3 может применяться для передачи служебной информации и пилот-сигналов. Выбор нижней границы диапазона МВ-I был сделан исходя из того, что для уверенного выделения цветного телевизионного сигнала из высокочастотного амплитудно-модулированного радиосигнала час-

тота несущей должна в несколько раз превышать максимальную частоту модулирующего сигнала. Вероятно, в будущем от этих каналов придется отказаться из-за необходимости увеличения полосы обратного канала до 50-60 МГц. В диапазоне МВ-II (84 – 100 МГц) находятся 2 канала, используемые аналогичным образом, однако, они частично перекрываются диапазоном FM-радио (87.5-108 МГц) и могут быть непригодны для ТВ вещания. Далее по частоте следует диапазон КТВ-I (110 – 174 МГц), в котором размещены 8 каналов. Обычно этот диапазон применяется для цифрового спутникового вещания (DSR) или для передачи данных. За ним находится диапазон МВ-III, в котором находятся еще 7 мых каналов.

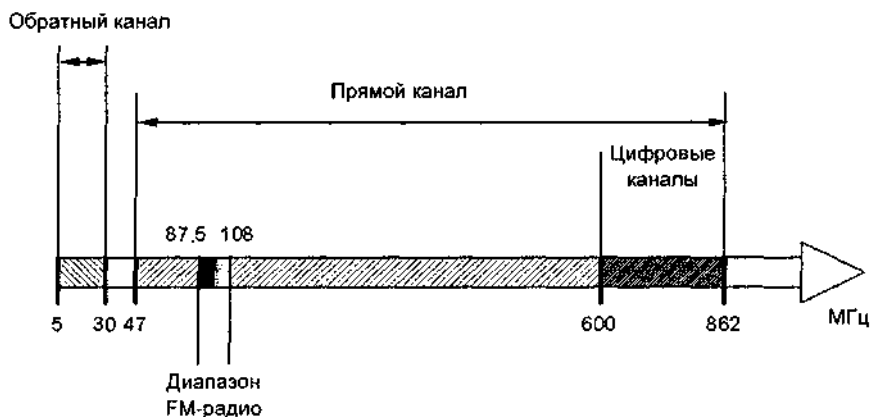


Рис. 3.12. Распределение спектра в кабельной сети

Выше располагается диапазон КТВ-II, содержащий 9 каналов СК, аналогичных по назначению каналам диапазона КТВ-I. Еще выше по частоте находится диапазон Hyperband, включающий 21 канал S-типа и предназначенный для передачи сигналов цифрового телевидения высокой четкости, например, в стандарте DVB-S. В окончании спектра расположены дециметровые диапазоны ДМВ-IV и ДМВ-V, в которых размещены 49 каналов k-типа. Каналы диапазонов МВ-I, МВ-II и МВ-III принимаются всеми без исключения телевизорами, поэтому обычно они занимают полностью для трансляции основных или обязательных каналов. Каналы диапазонов КТВ-I, КТВ-II и Hyperband, наоборот, принимаются далеко не всеми телевизорами. Каналы диапазонов ДМВ-IV и ДМВ-V принимаются большинством телевизоров и используются для трансляции как аналоговых, так и цифровых каналов. Верхняя граница ДМВ-V диапазона ограничена частотами, на которых начинает значительно сказываться затухание сигнала в кабеле, поэтому в верхней части спектра, на частотах выше 600 МГц, рекомендуется размещать цифровые каналы, которые менее подвержены искажениям, чем аналоговые.

Согласно распределению частот, приведенному в табл. 3.4, несущие частоты соседних радиоканалов отстоят друг от друга на 8 МГц (обратите внимание, что это не относится к диапазонам МВ-I и МВ-II, где шаг сетки не фиксирован). Следовательно, в полосе прямого направления 47 – 862 МГц общее количество аналоговых каналов составляет 99, а возможное количество цифровых каналов в полосе 600 – 862 МГц составляет более 220.

3.7. Распределение частот телевизионного вещания

Таблица 3.4

Сетка частот телевизионного вещания

№	Диапазон частот	Название канала	Полоса частот канала, МГц	Несущие частоты, изображения и звука, МГц		Частоты гетеродинов, МГц		Полосы частот зеркальных каналов, МГц	
				$F_{из}$	$F_{зв}$	для* $f_{гч1}$	для* $f_{гч2}$	для* $f_{гч1}$	для* $f_{гч2}$
1	МВ I	R1	48,5–56,5	49,75	56,25	87,75	88,65	119,0–127,0	120,8–128,8
2		R2	58,0–66,0	59,25	65,75	97,25	98,15	128,5–136,5	130,3–138,3
3		R3	76,0–84,0	77,25	83,75	115,25	116,15	146,5–154,5	148,3–156,3
4	МВ II	R4	84,0–92,0	85,25	91,75	123,25	124,15	154,5–162,5	156,3–164,3
5		R5	92,0–100,0	93,25	99,75	131,25	132,15	162,5–170,5	164,3–172,3
6	КАТВ I	СК-1	110,0–118,0	111,25	117,75	149,25	150,15	180,5–188,5	182,3–190,3
7		СК-2	118,0–126,0	119,25	125,75	157,25	158,15	188,5–196,5	190,3–198,3
8		СК-3	126,0–134,0	127,25	133,75	165,25	166,15	196,5–204,5	198,3–206,3
9		СК-4	134,0–142,0	135,25	141,75	173,25	174,15	204,5–212,5	206,3–214,3
10		СК-5	142,0–150,0	143,25	149,75	181,25	182,15	212,5–220,5	214,3–222,3
11		СК-6	150,0–158,0	151,25	157,75	189,25	190,15	220,5–228,5	222,3–230,5
12		СК-7	158,0–166,0	159,25	165,75	197,25	198,15	228,5–236,5	230,3–238,3
13		СК-8	166,0–174,0	167,25	173,75	205,25	206,15	236,5–244,5	238,3–246,3
14	МВ III	R6	174,0–182,0	175,25	181,75	213,25	214,15	244,5–252,5	246,3–254,3
15		R7	182,0–190,0	183,25	189,75	221,25	222,15	252,5–260,5	254,3–262,3
16		R8	190,0–198,0	191,25	197,75	229,25	230,15	260,5–268,5	262,3–270,3
17		R9	198,0–206,0	199,25	205,75	237,25	238,15	268,5–276,5	270,3–278,3
18		R10	206,0–214,0	207,25	213,75	245,25	246,15	276,5–284,5	278,3–286,3
19		R11	214,0–222,0	215,25	221,75	253,25	254,15	284,5–292,5	286,3–294,3
20		R12	222,0–230,0	223,25	229,75	261,25	262,15	292,5–300,5	294,3–302,3

Глава 3. Формирование сигнала

№	Диапазон частот	Название канала	Полоса частот канала, МГц	Несущие частоты, изображения и звука, МГц		Частоты гетеродинов, МГц		Полосы частот зеркальных каналов, МГц	
				$F_{из}$	$F_{зв}$	для* $f_{гч1}$	для* $f_{гч2}$	для* $f_{гч1}$	для* $f_{гч2}$
21	КАТВII	СК11	230,0–238,0	231,25	237,75	269,25	270,15	300,5–308,5	302,3–310,3
22		СК12	238,0–246,0	239,25	245,75	277,25	278,15	308,5–316,5	310,3–318,3
23		СК13	246,0–254,0	247,25	253,75	285,25	286,15	316,5–324,5	318,3–326,3
24		СК14	254,0–262,0	255,25	261,75	293,25	294,15	324,5–332,5	326,3–334,3
25		СК15	262,0–270,0	263,25	269,75	301,25	302,15	332,5–340,5	334,3–342,3
26		СК16	270,0–278,0	271,25	277,75	309,25	310,15	340,5–348,5	342,3–350,3
27		СК17	278,0–286,0	279,25	285,75	317,25	318,15	348,5–356,5	350,3–358,3
28		СК18	286,0–294,0	287,25	293,75	325,25	326,15	356,5–364,5	358,3–366,3
29		СК19	294,0–302,0	295,25	301,75	333,25	334,15	364,5–372,5	366,3–374,3
30	H Y P E R B A N D	S20	302,0–310,0	303,25	309,75	347,25	342,15	372,5–380,5	374,3–382,3
31		S21	310,0–318,0	311,25	317,75	355,25	350,15	380,5–388,5	382,3–390,3
32		S22	318,0–326,0	319,25	325,75	363,25	358,15	388,5–396,5	390,3–398,3
33		S23	326,0–334,0	327,25	333,75	371,25	366,15	396,5–404,5	398,3–406,3
34		S24	334,0–342,0	335,25	341,75	379,25	374,15	404,5–412,5	406,3–414,3
35		S25	342,0–350,0	343,25	349,75	387,25	382,15	412,5–420,5	414,3–422,3
36		S26	350,0–358,0	351,25	357,75	395,25	390,15	420,5–428,5	422,3–430,3
37		S27	358,0–366,0	359,25	365,75	403,25	398,15	428,5–436,5	430,3–438,3
38		S28	366,0–374,0	367,25	373,75	411,25	406,15	436,5–444,5	438,3–446,3
39		S29	374,0–382,0	375,25	381,75	419,25	414,15	444,5–452,5	446,3–454,3
40		S30	382,0–390,0	383,25	389,75	427,25	422,15	452,5–460,5	454,3–462,3
41		S31	390,0–398,0	391,25	397,75	435,25	430,15	460,5–468,5	462,3–470,3

3.7. Распределение частот телевизионного вещания

№	Диапазон частот	Название канала	Полоса частот канала, МГц	Несущие частоты, изображения и звука, МГц		Частоты гетеродинов, МГц		Полосы частот зеркальных каналов, МГц	
				$F_{из}$	$F_{зв}$	для* $f_{пч1}$	для* $f_{пч2}$	для* $f_{пч1}$	для* $f_{пч2}$
42	Н У Р Е Р В А N D	S32	398,0–406,0	399,25	405,75	443,25	438,15	468,5–476,5	470,3–478,3
43		S33	406,0–414,0	407,25	413,75	451,25	446,15	476,5–484,5	478,3–486,3
44		S34	414,0–422,0	415,25	421,75	459,25	454,15	484,5–492,5	486,3–494,3
45		S35	422,0–430,0	423,25	429,75	467,25	462,15	492,5–500,5	494,3–502,3
46		S36	430,0–438,0	431,25	437,75	475,25	470,15	500,5–508,5	502,3–510,3
47		S37	438,0–446,0	439,25	445,75	483,25	478,15	508,5–516,5	510,3–518,3
48		S38	446,0–454,0	447,25	453,75	491,25	486,15	516,5–524,5	518,3–526,3
49		S39	454,0–462,0	455,25	461,75	499,25	494,15	524,5–532,5	526,3–534,3
50		S40	462,0–470,0	463,25	469,75	507,25	502,15	532,5–540,5	534,3–542,3
51		ДМВ IV	k.21	470,0–478,0	471,25	477,75	509,25	510,15	540,5–548,5
52	k.22		478,0–486,0	479,25	485,75	517,25	518,15	548,5–556,5	550,3–558,3
53	k.23		486,0–494,0	487,25	493,75	525,25	526,15	556,5–564,5	558,3–566,3
54	k.24		496,0–502,0	495,25	501,75	533,25	534,15	564,5–572,5	566,3–574,3
55	k.25		502,0–510,0	503,25	509,75	541,25	542,15	572,5–580,5	574,3–582,3
56	k.26		510,0–518,0	511,25	517,75	549,25	550,15	580,5–588,5	582,3–590,3
57	k.27		518,0–526,0	519,25	525,75	557,25	558,15	588,5–596,5	590,3–598,3
58	k.28		526,0–534,0	527,25	533,75	565,25	566,15	596,5–604,5	598,3–606,3
59	k.29		534,0–542,0	535,25	541,75	573,25	574,15	604,5–612,5	606,3–614,3
60	k.30		542,0–550,0	543,25	549,75	581,25	582,15	612,5–620,5	614,3–622,3

Глава 3. Формирование сигнала

№	Диапазон частот	Название канала	Полоса частот канала, МГц	Несущие частоты, изображения и звука, МГц		Частоты гетеродинов, МГц		Полосы частот зеркальных каналов, МГц	
				$F_{из}$	$F_{зв}$	для* $f_{гч1}$	для* $f_{гч2}$	для* $f_{лч1}$	для* $f_{лч2}$
61	ДМВ IV	k.31	550,0–558,0	551,25	557,75	589,25	590,15	620,5–628,5	622,3–630,3
62		k.32	558,0–566,0	559,25	565,75	597,25	598,15	628,5–636,5	630,3–638,3
63		k.33	566,0–574,0	567,25	573,75	605,25	606,15	636,5–644,5	638,3–646,3
64		k.34	574,0–582,0	575,25	581,75	613,25	614,15	644,5–652,5	646,3–654,3
65	ДМВ V	k.35	582,0–590,0	583,25	589,75	621,25	622,15	652,5–660,5	654,3–662,3
66		k.36	590,0–598,0	591,25	597,75	629,25	630,15	660,5–668,5	662,3–670,3
67		k.37	598,0–606,0	599,25	605,75	637,25	638,15	668,5–676,5	670,3–678,3
68		k.38	606,0–614,0	607,25	613,75	645,25	646,15	676,5–684,5	678,3–686,3
69		k.39	614,0–622,0	615,25	621,75	653,25	654,15	684,5–692,5	686,3–694,3
70		k.40	622,0–630,0	623,25	629,75	661,25	662,15	692,5–700,5	694,3–702,3
71		k.41	630,0–638,0	631,25	637,75	669,25	670,15	700,5–708,5	702,3–710,3
72		k.42	638,0–646,0	639,25	645,75	677,25	678,15	708,5–716,5	710,3–718,3
73		k.43	646,0–654,0	647,25	653,75	685,25	686,15	716,5–724,5	718,3–726,3
74		k.44	654,0–662,0	655,25	661,75	693,25	694,15	724,5–732,5	726,3–734,3
75		k.45	662,0–670,0	663,25	669,75	701,25	702,15	732,5–740,5	734,3–742,3
76		k.46	670,0–678,0	671,25	677,75	709,25	710,15	740,5–748,5	742,3–750,3
77		k.47	678,0–686,0	679,25	685,75	717,25	718,15	748,5–756,5	750,3–758,3
78		k.48	686,0–694,0	687,25	693,75	725,25	726,15	756,5–764,5	758,3–766,3
79		k.49	694,0–702,0	695,25	701,75	733,25	734,15	764,5–772,5	766,3–774,3
80		k.50	702,0–710,0	703,25	709,75	741,25	742,15	772,5–780,5	774,3–782,3
81		k.51	710,0–718,0	711,25	717,75	749,25	750,15	780,5–788,5	782,3–790,3

3.7. Распределение частот телевизионного вещания

№	Диапазон частот	Название канала	Полоса частот канала, МГц	Несущие частоты, изображения и звука, МГц		Частоты гетеродинов, МГц		Полосы частот зеркальных каналов, МГц	
				$F_{из}$	$F_{зв}$	для* $f_{лч1}$	для* $f_{лч2}$	для* $f_{лч1}$	для* $f_{лч2}$
82	ДМВ V	k.52	718,0–726,0	719,25	725,75	757,25	758,15	788,5–796,5	790,3–798,3
83		k.53	726,0–734,0	727,25	733,75	765,25	766,15	796,5–804,5	798,3–806,3
84		k.54	734,0–742,0	735,25	741,75	773,25	774,15	804,5–812,5	806,3–814,3
85		k.55	742,0–750,0	743,25	749,75	781,25	782,15	812,5–820,5	814,3–822,3
86		k.56	750,0–758,0	751,25	757,75	789,25	790,15	820,5–828,5	822,3–830,3
87		k.57	758,0–766,0	759,25	765,75	797,25	798,15	828,5–836,5	830,3–838,3
88		k.58	766,0–774,0	767,25	773,75	805,25	806,15	836,5–844,5	838,3–846,3
89		k.59	774,0–782,0	775,25	781,75	813,25	814,15	844,5–852,5	846,3–854,3
90		k.60	782,0–790,0	783,25	789,75	821,25	822,15	852,5–860,5	854,3–862,3
91		k.61	790,0–798,0	791,25	797,75	829,25	830,15	860,5–868,5	862,3–870,3
92		k.62	798,0–806,0	799,25	805,75	837,25	838,15	868,5–876,5	870,3–878,3
93		k.63	806,0–814,0	807,25	813,75	845,25	846,15	876,5–884,5	878,3–886,3
94		k.64	814,0–822,0	815,25	821,75	853,25	854,15	884,5–892,5	886,3–894,3
95		k.65	822,0–830,0	823,25	829,75	861,25	862,15	892,5–900,5	894,3–902,3
96		k.66	830,0–838,0	831,25	837,75	869,25	870,15	900,5–908,5	902,3–910,3
97		k.67	838,0–846,0	839,25	845,75	877,25	878,15	908,5–916,5	910,3–918,3
98		k.68	846,0–854,0	847,25	853,75	885,25	886,15	916,5–924,5	918,3–926,3
99		k.69	854,0–862,0	855,25	861,75	893,25	894,15	924,5–932,5	926,3–934,3

* $f_{лч1} = 38,0$ МГц, $f_{лч2} = 38,9$ МГц.

Частоты $f_{пч1}$ и $f_{пч2}$, называемые в теории радиоприемных устройств промежуточными, служат для обработки (усиления) ТВ сигнала перед его детектированием в схеме гетеродинного приема (рис. 3.13). В целях инверсии принимаемого радиочастотного сигнала, частота гетеродина f_r выбирается выше частоты несущей изображения $f_{из}$ на величину промежуточной частоты $f_{пч}$, т.е. выполняется следующее условие:

$$f_{пч} = f_r - f_{из}.$$

В старых моделях отечественных телевизоров промежуточная частота изображения составляет 38.0 МГц, а в современных отечественных и импортных моделях она равна 38.9 МГц.

В связи с таким большим количеством каналов в современных сетях резко возрастают искажения, обусловленные как взаимным влиянием каналов внутри самой кабельной сети, так и влиянием внешних помех разного рода. Проблема шумов и искажений в кабельных сетях частично решается с помощью частотно-планирования, которое становится необходимым начальным этапом проектирования любой широкополосной сети.

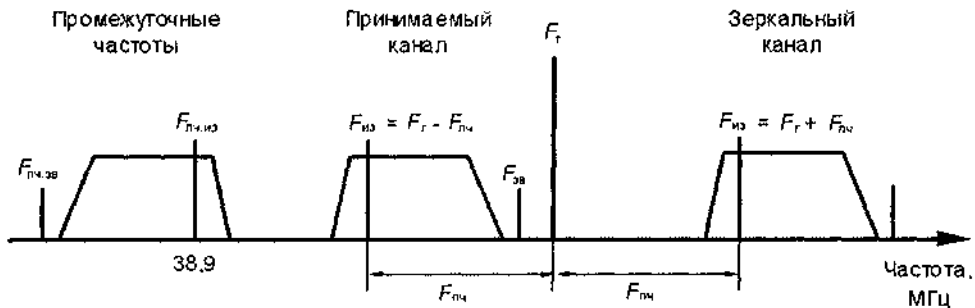


Рис. 3.13. Каналы промежуточной частоты

Частотным планированием называется процедура распределения или расстановки первичных ТВ сигналов (спутниковых сигналов, сигналов эфирного ТВ вещания и собственных каналов кабельного оператора) по номерам радиоканалов частотной сетки, используемой в данной кабельной сети. Иначе, пользуясь стандартной терминологией, можно сказать, что формирование частотного плана кабельной сети заключается в расстановке всех имеющихся каналов приема головной станции по возможным каналам распределения в кабельной сети. В России обычно используют расстановку кабельных каналов по частотной сетке стандарта OIRT с шагом в 8 МГц. Поскольку в общественном эфирном вещании также используется частотная сетка OIRT с шагом в 8 МГц, то эфирные каналы в кабельной сети в общем случае необходимо переносить на другие частоты, чтобы устранить влияние эфирных каналов на кабельные. Процедура преобразования частот каналов называется конвертированием. Спутниковые каналы, очевидно, нужно конвертировать в любом случае, поскольку они передаются в более высоком частотном диапазоне (10 ГГц). Частотный план вещания в кабельной сети, таким образом, является планом конвертации каналов приема в каналы распределения. Конвертирование частот

осуществляется на головной станции перед подачей их в линейный тракт распределительной кабельной сети.

Подчеркнем, что здесь идет речь именно о расстановке по возможным каналам вещания. Это означает, что далеко не все стандартные каналы вещания, приведенные в табл. 3.4, можно будет использовать в конкретной кабельной сети, причем в каждой сети частотный план будет свой, в зависимости от набора и количества каналов и других служб в ней, а также от электромагнитной обстановки в эфире. Такая ситуация является следствием нескольких ограничений, связанных с особенностями технологии передачи по коаксиальному кабелю и с особенностями работы телевизионных приемников. Сформулируем основные особенности, которые нужно учитывать при составлении частотного плана.

Прежде всего, не следует использовать в кабельной сети каналы, частота которых совпадает с частотой занятых эфирных каналов. В противном случае будет происходить прямая электромагнитная наводка, как на коаксиальный кабель, так и непосредственно на антенный вход телевизора, что значительно ухудшит качество. Это правило диктуется обычными соображениями электромагнитной совместимости и относится не только к частотам эфирных ТВ каналов, но и к частотам, занятым другими эфирными источниками радиосигнала (средства мобильной связи, радиостанции, радиолокаторы, промышленные электроустановки). Например, канал $R1$ всегда занят общегосударственным вещанием и не может использоваться, конвертация в каналы $R4$ и $R5$ будет невозможна, если они заняты сигналами радиостанций FM-диапазона, конвертация в канал $R3$ нежелательна, поскольку он может использоваться для служебных целей и управления. Использование некоторых частот, занятых специальными службами, может быть запрещено государственными органами. Однако, из этого правила существует одно исключение – оно имеет силу только в том случае, когда эфирный сигнал от перечисленных выше источников достаточно силен в области обслуживания кабельной сети, чтобы являться помехой, т.е. при небольшом удалении от этих источников. Мощность радиосигнала (или мощность излучения источника), как известно, убывает пропорционально квадрату расстояния от источника, поэтому на значительном расстоянии от радиостанции телецентра помеха не будет оказывать заметного влияния. При этом эфирные ТВ каналы, подлежащие обязательно вещанию в кабельной сети, такие как ОРТ, РТР, НТВ, и особенно, каналы диапазона ДМВ можно было бы транслировать вовсе без конвертации с использованием избирательных канальных модулей прямого усиления. Чтобы выявить все занятые каналы необходимо перед составлением частотного плана исследовать электромагнитную обстановку в эфире и измерить мощность помех в области обслуживания кабельной сети в интересующей разработчика полосе частот. Таким образом, поражаются в первую очередь каналы, номера которых совпадают с номерами частот эфирного вещания, что можно сформулировать следующим образом:

$$N_1 = N_{\text{эфирн}}$$

Другое правило касается использования каналов, являющихся соседними с выбранным для трансляции в кабельной сети. Несмотря на достаточно высокую избирательность современных моделей телевизоров по соседнему каналу, его использование не рекомендуется, если подавление побочных продуктов

модуляции на головной станции составляет менее 60 дБ. Кроме того, сигнал соседнего канала может стать помехой вследствие высокой девиации частоты гетеродина телевизора. Если все-таки, количество транслируемых кабельных каналов настолько велико, что использование соседних каналов неизбежно, выходом может стать трансляция всех или некоторой части каналов в формате PAL, сигнал которого занимает полосу 7 МГц (вместо 8 МГц в формате SECAM). Это обеспечит наличие частотных интервалов между соседними каналами (менее плотное размещение) и снизит их влияние друг на друга. В общем же случае действует правило:

$$N_2 = N_{\text{каб}} \pm 1.$$

Следующая рекомендация относится к использованию зеркальных каналов. Здесь также сказываются конструктивные особенности телевизионных приемников. Зеркальным каналом называется паразитный канал, создаваемый телевизором при гетеродинном приеме вследствие преобразования частот принимаемого канала вверх при сложении промежуточной частоты с частотой гетеродина (механизм образования зеркального канала показан на рис. 3.13):

$$f_{\text{из}} = f_{\text{пч}} + f_{\text{г}}.$$

В результате некоторый канал с номером N , выбранный для трансляции в кабельной сети, поражает канал, являющийся зеркальным по отношению к нему. За подавление частот зеркального канала в схеме телевизионного приемника отвечает входной ВЧ фильтр, не обладающий высокой избирательностью. Поскольку избирательность подавляющего большинства моделей телевизоров по зеркальному каналу менее 60 дБ, использование этих каналов оказывается невозможным. В табл. 3.4 приведены частоты зеркальных каналов каждого радиоканала для обеих промежуточных частот. При составлении частотного плана можно пользоваться либо этой таблицей, либо простым правилом, следующим из последней формулы. При известной промежуточной частоте зеркальным каналом оказывается канал с номером $N+9$:

$$N_3 = N_{\text{каб}} + 9.$$

Еще одним важным обстоятельством является влияние гетеродинов телевизоров, принимающих разные каналы, друг на друга. Сигнал гетеродина (в особенности старых моделей телевизоров) проникает через антенный кабель в сеть и становится помехой другим телевизорам, подключенным к тому же распределительному сегменту сети. Так гетеродин одного телевизора может серьезно ухудшить или даже практически заблокировать работу целого сегмента кабельной сети. По этой причине для современных моделей телевизоров существует ограничение на напряжение сигнала гетеродина, при котором он не создает помех в сети – оно не должно превышать 54 дБ-мВ. Однако, для российских кабельных сетей разработчик вынужден учитывать наличие у абонентов моделей телевизоров, в которых это ограничение не соблюдается, и не использовать каналы, пораженные частотами гетеродинов. Теоретически влиять на прием каналов может не только сама частота гетеродина, но и ее гармоники. Например, для канала $R7$, несущая частота изображения которого равна 183,25 МГц, частота гетеродина составляет 221,25 МГц. Эта частота попадает в полосу канала $R11$, у которого несущая изображения равна 215,25 МГц. Третья гармоника гетеродина того же

канала имеет частоту 663,75 МГц и полагает в полосу канала k.45, у которого несущая изображения равна 663,25 МГц. Но, поскольку амплитуды гармоник убывают пропорционально квадрату их номеров, учитывается только основная частота.

В табл. 3.4 приведены частоты гетеродинов каждого радиоканала для обеих промежуточных частот. В общем случае, пользуясь приведенной выше формулой для вычисления несущей частоты изображения, можно установить номер канала, поражаемого частотой гетеродина по отношению к каналу, выбранному для трансляции в кабельной сети. Для моделей телевизоров с промежуточной частотой 38,0 МГц поражается канал с номером:

$$N_4 = N_{\text{каб}} + 4,$$

а для моделей телевизоров с промежуточной частотой 38,9 МГц поражается канал с номером:

$$N_5 = N_{\text{каб}} + 5.$$

Таким образом, при составлении частотного плана каналы с номерами N_1 , N_2 , N_3 и N_4 (или N_5) рекомендуется исключить. Однако, ограничиться учетом описанных выше условий можно только в сети с небольшим количеством телевизионных каналов. При увеличении количества транслируемых каналов, следует, кроме того, учитывать влияние каналов друг на друга, обусловленное нелинейными искажениями. Самым простым способом устранить влияние нелинейных гармонических составляющих является использование для трансляции в кабельной сети только каналов с нечетными номерами, на которые не попадают паразитные составляющие. Данные рекомендации нельзя напрямую применять к тем диапазонам, для которых шаг частотной сетки не равен 8 МГц (МВ-I, МВ-II).

Расстановка каналов в кабельной сети может выполняться и в соответствии с частотной сеткой стандарта CCIR, шаг которой составляет 7 МГц (западноевропейский стандарт). Перечисленные правила конвертации частот в этом случае также действуют, но несколько видоизменяются. Например, зеркальным по отношению к транслируемому каналу с номером N оказывается канал с номером $N + 11$.

Ввиду сказанного становится понятно, что число каналов, которые фактически могут быть использованы для передачи телевизионного сигнала, существенно меньше, чем число каналов, имеющихся в частотной сетке. Поэтому необходимой мерой для расширения канальной емкости сети КТВ является увеличение верхней границы используемой полосы частот (до 1000 МГц и более) и трансляция сигналов в цифровом формате.

В полосе частот 5 – 30 МГц располагается канал обратного направления передачи (upstream) в кабельных сетях. В современных двунаправленных интерактивных кабельных сетях эти частоты стали активно использоваться для передачи сигналов от абонентов на головную станцию. Наличие обратного канала также необходимо учитывать при составлении частотного плана сети КТВ, поскольку, например, вторая и третья гармоники сигнала обратного канала могут создавать помехи в прямом канале. Большая проблема диапазона обратного канала состоит в том, что он сильно зашумлен эфирными источниками и различными бытовыми помехами.

Резюме

Электромагнитные волны являются средством передачи телевизионного сигнала как в системах эфирного, так и кабельного телевидения. Телевизионное изображение отличается от оригинального из-за искажений, возникающих в фотоэлектрических преобразователях и в канале связи. Часть искажений, в том числе и возникающих в телевизионном приемнике, корректируется на передающем телевизионном центре, что существенно упрощает конструкцию приемника. Телевизионный сигнал либо формируется на головной станции, либо ретранслируется ею в стандарте какой-либо из существующих ТВ систем. Существуют аналоговые (SECAM, PAL, NTSC) и цифровые (семейство DVB) системы телевидения. Сигналы цифрового и аналогового телевидения различаются по способу модуляции, помехозащищенности и ширине занимаемой полосы частот. По всем этим показателям цифровое телевидение превосходит аналоговое, хотя аналоговое остается пока более распространенным в силу своей дешевизны. Смещение цифровых каналов в верхнюю часть частотного диапазона оправдано их более высокой помехозащищенностью. По той же причине уровень цифровых каналов на 10 дБ ниже по отношению к аналоговым. Модулированные ТВ сигналы мультиплексируются каким-либо способом для получения группового сигнала. Цифровое мультиплексирование выполняется на основе технологии временного разделения канала передачи, а аналоговое – на основе частотного или волнового разделения канала.

Перед подачей в кабельную сеть аналоговые и цифровые телевизионные сигналы расставляются по номерам радиоканалов выбранной частотной сетки (OIRT и CCIR). Расстановка сигналов по свободным номерам радиоканалов называется частотным планированием. Формирование частотного плана является непростой задачей, с которой приходится сталкиваться разработчику на начальной стадии проектирования сети КТВ. Первым требованием при составлении частотного плана является соблюдение условий электромагнитной совместимости с различными внешними источниками излучения в полосе частот системы КТВ. При этом необходимо учитывать взаимное влияние параметров каналов и оборудования, среди которых частоты каналов, эффективные мощности излучения передатчиков, помехозащищенность телевизионных приемников. Составление частотного плана осложняется следующими обстоятельствами. Во-первых, разработчик вынужден ориентироваться на характеристики устаревших моделей телевизионных приемников, все еще достаточно распространенных, которые имеют недостаточную избирательность по соседнему и зеркальному каналам. Во-вторых, современные системы КТВ характеризуются большим количеством ТВ каналов, поэтому кроме внешних помех существуют помехи, порождаемые внутри самой кабельной сети и обусловленные взаимным влиянием каналов. В связи с этим частоты каналов, выбранных для трансляции в кабельной сети, не должны совпадать с частотами соседних и зеркальных каналов, а также с частотами, поражаемыми напряжением гетеродина и продуктами нелинейных искажений.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

При проектировании любой системы передачи в первую очередь имеем дело с ее амплитудно-частотной характеристикой в пределах всей полосы частот, которую использует данная система для передачи информации. Как уже было сказано, современные системы КТВ используют полосу от 5 до 1000 МГц. В этой полосе передается множество телевизионных и нетелевизионных сигналов. Амплитудно-частотные характеристики практически всех реальных устройств неравномерны и нелинейны в большей или меньшей степени. Чем выше неравномерность и нелинейность частотной характеристики в пределах полосы передачи, тем хуже будет верность воспроизведения передаваемой информации на выходе системы. При увеличении числа передаваемых сигналов нелинейность амплитудно-частотной характеристики системы проявляется сильнее, вызывая значительные искажения сигналов. Поскольку амплитудно-частотная характеристика системы передачи складывается из характеристик отдельных ее элементов, можно логически выделить в ее формировании доли влияния кабеля и различных приборов. Большую часть линейных отклонений амплитудно-частотной характеристики в кабельной системе передачи можно компенсировать с помощью устройств, называемых эквалайзерами.

4.1. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики

Важнейшей характеристикой любого прибора кабельной системы, как активного, так и пассивного, является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). АЧХ отображает зависимость уровня сигнала на выходе прибора или системы от частоты входного сигнала в рабочей полосе частот. Значение АЧХ на каждой частоте связано со значением *коэффициента передачи* (КП) системы, который является отношением ее выходного уровня к входному. Зависимость суммарного усиления и ослабления прибора или системы (в децибелах) от частоты будем называть частотной характеристикой коэффициента передачи. Она соответствует АЧХ, но в данном случае удобнее, так как все элементы кабельной сети оцениваются потерями или усилением. В частности, характеристика КП для пассивного прибора представляет собой набор значений потерь, а для активного прибора – это набор значений усиления в пределах рабочей полосы частот.

Для любого прибора производитель определяет рабочую полосу частот, в которой его можно использовать. Это значит, что в пределах этой полосы прибор гарантировано пропускает все входные сигналы с заданным коэффициентом передачи. Если, допустим, потери передачи аттенюатора нормированы, то они не превысят названных потерь для любого сигнала, частота которого находится в пределах данной рабочей полосы. Например, ответвитель с номинальным ослаблением на ответвительном порте 7 дБ, рассчитанный на полосу 1000 МГц, не

создаст потерь больше 7 дБ для любого сигнала с частотой меньшей или равной 1000 МГц. Однако, этот прибор может иметь более низкое ослабление на некоторых частотах внутри данной полосы, ниже 1000 МГц. Идеальной была бы абсолютно ровная частотная характеристика прибора, при которой на любой частоте в пределах заданной полосы ослабление или усиление сигнала точно равно некоторой величине в дБ, но на практике это никогда не достигается. Поэтому для всех приборов в спецификации определяется также максимальное допустимое отклонение коэффициента передачи в рабочей полосе прибора, которое называется *неравномерностью АЧХ*. Это касается и пассивных приборов, и, в большей степени, усилителей.

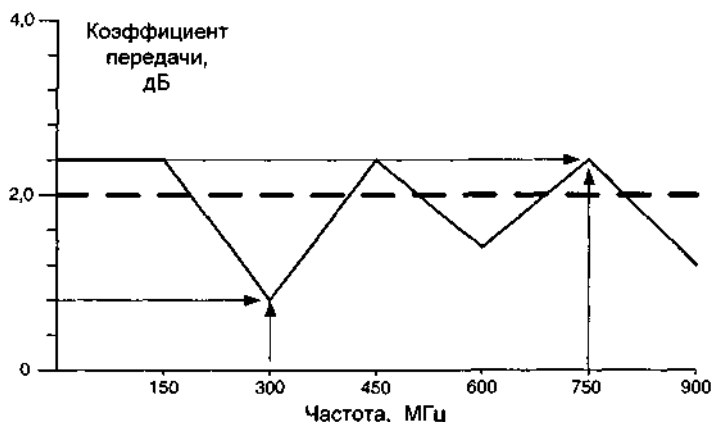


Рис. 4.1. Неравномерность АЧХ

Неравномерность АЧХ любого прибора вычисляется для двух частот, на которых отклонения коэффициента передачи прибора максимальны. При расширении полосы системы передачи неравномерность АЧХ прибора должна увеличиваться, создавая более серьезные трудности при их устранении. При проектировании систем с относительно узкой полосой передачи, скажем 300 МГц, неизбежные отклонения в пределах полосы могут оказаться довольно незначительными (не более 1 дБ). В таком случае ими можно пренебречь и определить каждый параметр ослабления узкополосного прибора только одним номинальным значением без учета неравномерности его АЧХ. В узкополосной системе допускается выполнять расчет уровня сигнала исходя только из одного набора параметров прибора, относящихся к наихудшему случаю (например, случаю наибольших потерь). При проектировании широкополосной системы частотные свойства коэффициента передачи приходится учитывать, поскольку искажения сигнала становятся здесь слишком заметными. Таким образом, для всех приборов широкополосной системы все показатели задаются для двух частот, лежащих в полосе 5 – 1000 МГц, например, для верхней частоты 1000 МГц и промежуточной частоты 450 МГц. При расчете широкополосной системы потери передачи расчеты выполняются для двух частот рабочей полосы.

На рис. 4.1 изображена характеристика затухания гипотетического прибора, отражающая изменение коэффициента передачи сигнала в полосе до 900 МГц. Идеальная характеристика этого прибора (для случая, когда он не вносил бы

никаких искажений) обозначена пунктирной линией, тогда как непрерывной линией показана реальная измеренная характеристика прибора. Допустим, что в спецификации этого прибора определено, что его коэффициент передачи составляет 2 дБ. Кроме того, в спецификации определена разность между минимальным и максимальным возможными коэффициентом передачи во всей используемой полосе частот (900 МГц). Допустим, эта разность равна 1,6 дБ. Обратите внимание, что коэффициент передачи, измеренный на частоте 300 МГц, равен 0,8 дБ, а на частоте 750 МГц он равен 2,4 дБ. Эти две точки являются точками наибольшего отклонения АЧХ во всей полосе, поэтому разность коэффициентов передачи между ними (2,4 дБ – 0,8 дБ = 1,6 дБ) и определена в спецификации как неравномерность амплитудно-частотной характеристики.

4.2. Амплитудно-частотная характеристика элементов кабельной системы

Частотные свойства кабельной системы в целом определяется также с помощью амплитудно-частотной характеристики. Амплитудно-частотная характеристика системы передачи складывается из АЧХ отдельных ее элементов. Каждый из приборов вносит свою неравномерность в частотную характеристику системы, характер которой индивидуален именно для данного типа приборов и может быть назван “почерком” прибора (например, спад частотной характеристики некоторых ответвителей в конце полосы передачи). Поскольку приборы производятся серийно в большом количестве, то однотипные блоки имеют почти одинаковые кривые АЧХ и, следовательно, вносят во всей полосе одинаковые искажения. В общем случае неравномерности АЧХ разных приборов в системе носят случайный характер, поэтому в результате их сложения общая неравномерность системы будет выражена очень слабо, за исключением длинного каскада одинаковых приборов. Несколько одинаковых блоков, соединенных последовательно, будут создавать на одних и тех же частотах более сильный суммарный спад или всплеск в результирующей характеристике. В большей степени это относится к усилителям, которые часто образуют в сети протяженные каскады и при использовании одинаковых блоков особенность их АЧХ будет выражена более сильно. Если усилитель имеет внутреннюю регулировку для коррекции характеристики, он способен устранить неравномерность, которая была внесена кабельным участком, но только в пределах своего ограниченного диапазона регулировки.

Вид кривой АЧХ пассивных и активных приборов зависит от многих факторов, связанных с их конструктивными схемотехническими особенностями. Как правило, АЧХ пассивных приборов имеют очень незначительную неравномерность (менее 1 дБ) и, что особенно важно с точки зрения искажений сигнала, ее можно считать практически линейной. Незначительные спады и всплески АЧХ у них объясняются индуктивными и емкостными частотными свойствами, которые проявляются, в основном, вблизи границ полосы передачи. Типичная АЧХ пассивного прибора (например, ответвителя) изображена на рис. 4.2. Если же пассивные элементы имеют большую неравномерность АЧХ, необходимо проводить расчеты сети для разных частот (по крайней мере для двух).

С активными приборами (усилителями) дело обстоит несколько сложнее. Они имеют сложную конструкцию, включающую несколько пассивных и активных блоков, каждый из которых способен усиливать неравномерность АЧХ.

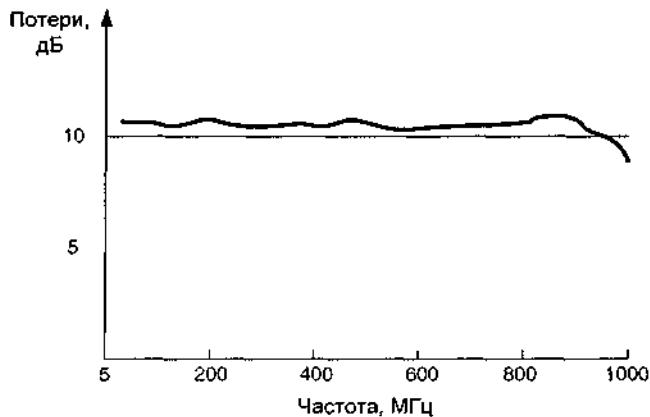


Рис. 4.2. Амплитудно-частотная характеристика пассивного прибора

В связи с этим с неравномерностью АЧХ активных приборов становится гораздо выше (до 3 дБ) и с ней приходится считаться. Но главная особенность активных приборов заключается в том, что их АЧХ нельзя считать линейной из-за нелинейности характеристик транзисторов, являющихся основными элементами любого усилителя.

Неравномерность АЧХ корректируется в самом усилителе с помощью встроенных и дополнительных межкаскадных эквалайзеров. Для уменьшения нелинейности АЧХ усилителя производители применяют различные схемотехнические решения, например, широко известную балансную схему. В результате, как и в случае пассивных приборов, обычно можно пренебречь неравномерностью частотной характеристики, вносимой усилителями с внутренними устройствами межкаскадного выравнивания коэффициента усиления. Неравномерность АЧХ такого усилителя составляет от 1,5 до 2 дБ. Типичная АЧХ усилителя без межкаскадного выравнивания изображена на рис. 4.3.

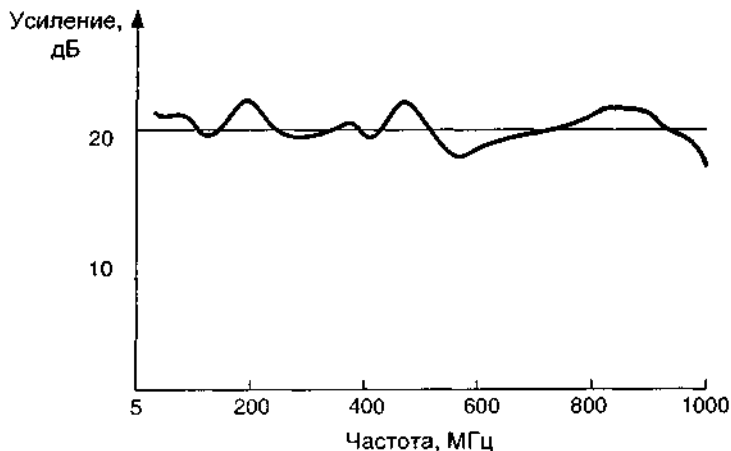


Рис. 4.3. Амплитудно-частотная характеристика активного прибора

Амплитудно-частотная характеристика коаксиального кабеля в общем случае является неравномерной и нелинейной. Физические свойства коаксиального кабеля таковы, что он создает неодинаковые потери передачи для разных частот спектра. Например, потери сигнала на частоте 750 МГц могут быть в два раза больше, чем на частоте 250 МГц. Можно сказать, кабель создает "наклон" спектра передачи сигналов, внося высокое затухание на высоких частотах и низкое затухание на низких частотах. Величина этого наклона может быть очень значительной.

Экспериментально установлено, что зависимость коэффициента затухания от частоты f для коаксиального кабеля имеет вид:

$$L = a + bf + c\sqrt{f},$$

где значения коэффициентов $c \gg a$, $c \gg b$ зависят от конкретного типа кабеля.

Из этой формулы видно, что считать характеристику затухания кабеля линейной можно лишь с очень плохим приближением. Большое влияние на затухание оказывает нелинейный член, благодаря которому потери увеличиваются прямо пропорционально квадратному корню из частоты, поэтому в практических расчетах затухание для частоты f рассчитывается обычно по следующей приближенной формуле:

$$L = L_0 \sqrt{\frac{f}{f_0}},$$

где L_0 – указанное в спецификации значение затухания для частоты f_0 .

Типичная характеристика передачи коаксиального кабеля в полосе от 5 до 1000 МГц показана на рис. 4.4.

Предполагается, что на вход отрезка кабеля подаются сигналы с одинаковыми уровнями во всем диапазоне частот. На выходе кабеля сигнал испытывает минимальное затухание на низких частотах, поэтому его уровень максимален. На высоких частотах, наоборот, затухание наибольшее, следовательно, сигнал имеет наименьший уровень. Затухание в кабеле зависит также и от его длины, поэтому потери задаются для какого-либо фиксированного отрезка, обычно 100 м.

Частотная зависимость потерь в кабеле объясняется действием скин-эффекта. Свойство наклона спектра передачи является неотъемлемым и неустранимым свойством коаксиального кабеля. Отклонения уровней и форма частотных искажений, вносимых кабелями большой длины, слишком существенны. Например, при передаче по кабелю длиной 600 м различие потерь передачи между частотами 50 МГц и 900 МГц обычная разность в потерях может составлять от 15 до 20 дБ.

Такой неравномерностью нельзя пренебречь, так как шум и интермодуляция, создаваемые в этом случае усилителями будут значительно влиять на качество передачи в системе. Поэтому система должна корректировать или, точнее, выравнивать частотную характеристику потерь в кабеле для создания нормального рабочего режима для всех усилителей. Однако практическое решение этой задачи не представляет больших трудностей, поскольку, что очень важно для разработчика кабельной сети, результат его действия предсказуем. Это означает, что разработчик может рассчитать величину наклона, создаваемого кабелем определенной длины, в заданном диапазоне частот и спроекти-

ровать данный участок так, чтобы компенсировать именно этот наклон с помощью специального эквалайзера, имеющего обратную частотную характеристику и установленного в окончании кабельного участка (коррекция на выходе участка) или в начале кабельного участка (предкоррекция). Таким образом, получим на выходе участка равномерную или, по крайней мере, очень близкую к равномерной частотную характеристику.

Хотя и считается, что неравномерность частотной характеристики для кабеля не имеет значения, в действительности это может оказаться не всегда правильным. Дело в том, что в процессе изготовления, транспортировки и прокладки кабель подвергается множеству механических воздействий, в результате которых возможно повреждение, образование перегибов и петель кабеля в точках его крепления к мачтам или на поворотах маршрута кабеля. Это может привести к образованию в структуре кабеля сильных неоднородностей, при которых неравномерность характеристики, обычно проявляющаяся на какой-либо одной частоте, станет очень значительной. Единственным выходом в этом случае будет замена поврежденного кабеля.

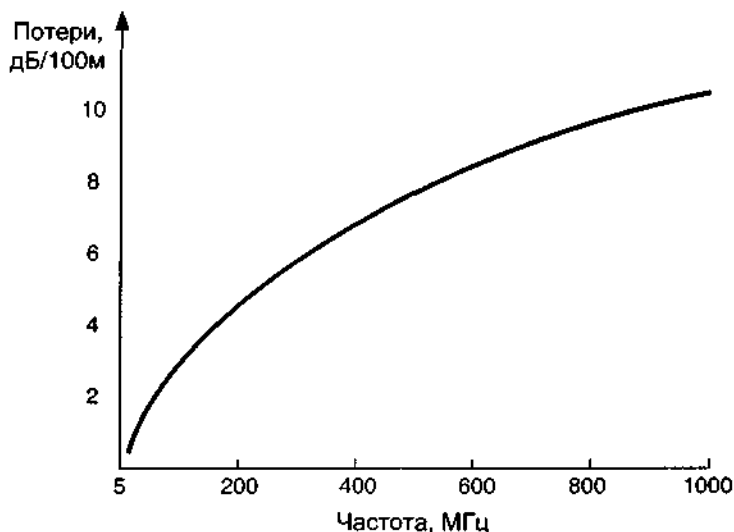


Рис. 4.4. Амплитудно-частотная характеристика коаксиального кабеля

На рис. 4.5 показана частотная характеристика коэффициента передачи части линейного тракта кабельной системы – магистрального каскада усилителей. В идеальном случае коэффициент передачи системы должен быть равен нулю.

Каждый усилитель компенсирует потери на своем участке, складывающиеся из потерь в кабеле и потерь в пассивных приборах. Вид этой итоговой кривой формируется случайным образом и может быть различным. На изображенной характеристике самый низкий уровень сигнала будет получен на частоте 220 МГц, где коэффициент передачи равен $-3,5$ дБ, а самый высокий уровень будет получен на частоте 700 МГц, где коэффициент передачи равен $+3,5$ дБ. В этом случае будем говорить, что неравномерность частотной характеристики система равна 7 дБ ($-3,5 + 3,5 = 7$).

При проектировании системы передачи необходимо учитывать частотные характеристики всех ее компонентов, чтобы разработчик смог рассчитать возможное искажение частотной характеристики системы в целом и компенсировать его. В последующих главах будет показано, что корректировка уровней передачи может быть выполнена в каждом усилителе системы устройствами АРУ на отдельных частотах полосы.

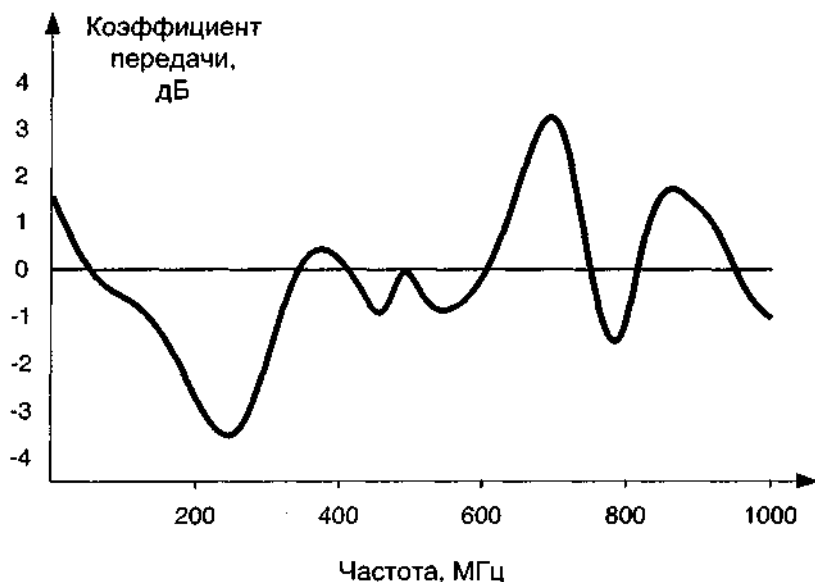


Рис. 4.5. Частотная характеристика кабельной системы

Здесь рассмотрено другое средство коррекции коэффициента передачи — выравнивание частотной характеристики во всей полосе с помощью корректоров АЧХ (эквалайзеров), которые устанавливаются в системе периодически на входах или выходах усилительных участков.

4.3. Выравнивание АЧХ на выходе усилительного участка

Выравнивание является методом восстановления исходного соотношения между уровнями сигналов в системе после того, как эти сигналы подверглись различным потерям при распространении через коаксиальный кабель. Выравнивание необходимо, поскольку не можем изменить физические свойства самого кабеля, состоящие в том, что в результате прохождения через кабель сигналов различных частот их уровни изменяются по-разному (неравномерно). Смысл выравнивания заключается в том, чтобы иметь возможность управлять уровнями сигналов во всем спектре так, чтобы компенсировать этот нежелательный наклон спектра. В конечном итоге необходимо получить такой спектр передачи, как если бы в действительности имелся кабель с ровной частотной характеристикой, т.е. если бы на всех частотах спектра потери в кабеле были одинаковы.

Эквалайзер является пассивным прибором кабельной сети, предназначенным для выравнивания искажений АЧХ, создаваемых коаксиальным кабелем. Он не создает усиления сигнала, а только вносит потери в проходящий через него сигнал, т.е. уменьшает его уровень. Но в отличие от других пассивных приборов, эквалайзер позволяет управлять величиной вносимых потерь, создавая разное ослабление сигнала на различных частотах. Делители и ответвители, как уже выяснили, незначительно влияют на вид частотной характеристики передачи по сравнению с влиянием кабеля. Эти приборы вносят почти одинаковые потери передачи на всех частотах в пределах их полосы пропускания, поэтому при расчете характеристики эквалайзера на каком-либо кабельном участке пассивные приборы обычно игнорируются и рассматривается только сам кабель. Например, если потери на участке между двумя усилителями составляют 22 дБ, но из них 4 дБ создают пассивные приборы, то необходимо использовать эквалайзер, рассчитанный на компенсацию 18 дБ потерь в кабеле, а не 22 дБ. Остальные 4 дБ должны компенсироваться усилением усилителя.

На рис. 4.6 показаны характеристики затухания кабеля длиной 600 м и эквалайзера в полосе частот от 50 МГц до 900 МГц.

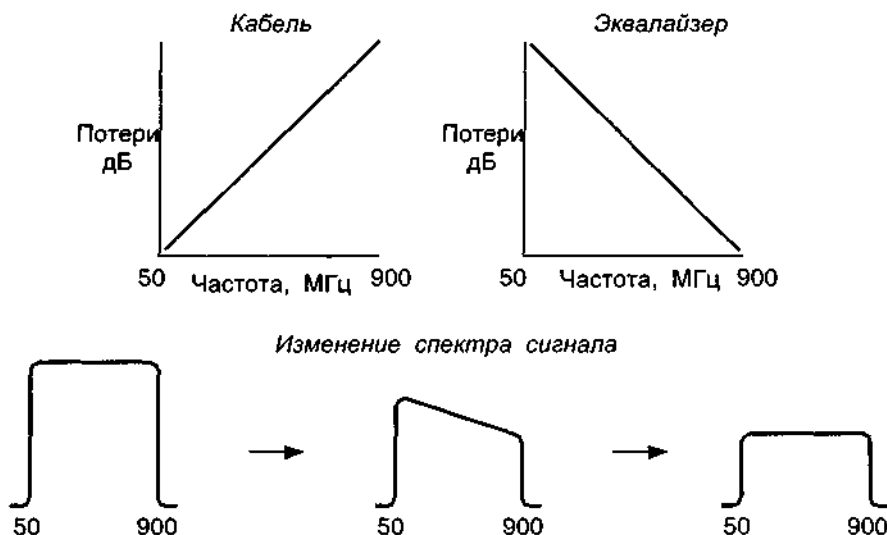


Рис. 4.6. Выравнивание частотной характеристики

Для упрощения частотная характеристика кабеля изображена линейной. Ниже показаны результаты влияния кабеля на спектр передачи сигналов в отсутствие эквалайзера и результат действия эквалайзера. Первоначальный спектр передачи, подаваемый в кабель, является "ровным", т.е. амплитуды всех передаваемых несущих в полосе передачи от 50 МГц до 900 МГц одинаковы. В центре нижнего ряда рисунка показан спектр передачи на выходе участка кабеля. Здесь амплитуда сигнала на частоте 50 МГц много выше, чем амплитуда сигнала на частоте 900 МГц, а амплитуды сигналов промежуточных частот уменьшаются пропорционально частоте.

Справа в нижнем ряду рисунка показан спектр передачи на выходе эквалайзера, к которому подключается следующий кабельный участок. Обратите вни-

мание на то, что параметры эквалайзера подобраны таким образом, что его АЧХ является обратной по отношению к АЧХ отрезка кабеля, в результате чего сложение частотных характеристик кабеля и эквалайзера дает выровненную результирующую характеристику. Сигналы любой частоты, проходящие через систему кабель-эквалайзер с выровненной частотной характеристикой, будут иметь одну и ту же амплитуду. Как на входе, так и на выходе комбинации кабель-эквалайзер спектры передачи являются выровненными. В результате получен требуемый эффект. Уровни сигнала были искажены пропорционально характеристике затухания кабеля, а с помощью эквалайзера они были восстановлены в исходном соотношении, т.е. было достигнуто равенство уровней всех сигналов в спектре передачи. Хотя после эквалайзера спектр передачи снова становится ровным, его амплитуда уменьшается, поскольку эквалайзер является пассивным прибором. На каждом кабельном участке устанавливается свой эквалайзер, который будет компенсировать индивидуальный наклон характеристики именно этого кабельного участка.

Несмотря на то, что на рис. 4.6 АЧХ кабеля изображена линейной, в действительности, как отмечалось ранее, она имеет существенную нелинейность. Следовательно, АЧХ эквалайзера также должна зависеть от частоты и иметь такую же степень нелинейности, но являться зеркальным отображением АЧХ кабеля относительно горизонтальной оси. Такая частотная зависимость легко достигается путем включения в схему эквалайзера, наряду с обычными резистивными сопротивлениями, индуктивных и емкостных цепей, сопротивление которых зависит от частоты. Степень нелинейности характеристики при этом регулируется подбором параметров RLC -цепей (номиналов емкостей, индуктивностей и сопротивлений). Простейшая схема частотно-зависимого эквалайзера и вид его АЧХ показаны на рис. 4.7. Эквалайзер, как и любой другой прибор, не должен нарушать условия согласования в кабельной сети, поэтому в его схеме входное и выходное сопротивление не зависит от частоты.

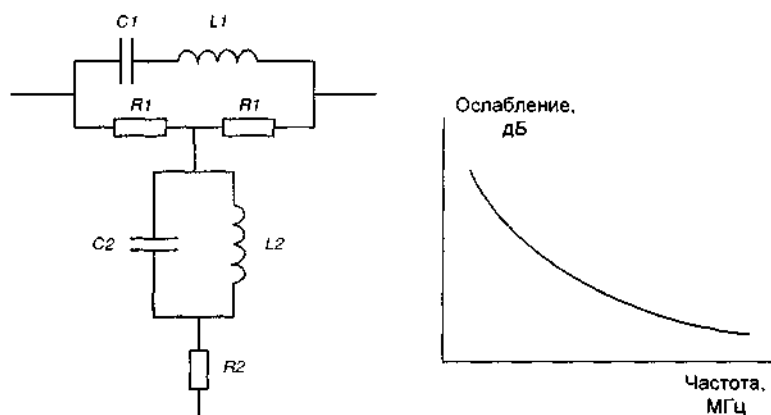


Рис. 4.7. Схема и АЧХ эквалайзера

Между компенсацией потерь с помощью усилителя с регулировкой усиления и компенсацией потерь с помощью эквалайзера есть очевидное различие. На первый взгляд усилитель и эквалайзер действуют аналогично – компенсируют

потери внутри предшествующего ему кабельного участка. Наклон характеристики кабельного участка выравнивается в обоих случаях, но усилитель восстанавливает амплитуды сигналов до прежнего значения, а эквалайзер нет. Иначе говоря, кабельный участок, состоящий из коаксиального кабеля и усилителя, имеет единичное усиление, а усиление кабельного участка, включающего кабель и эквалайзер, оказывается меньше единицы.

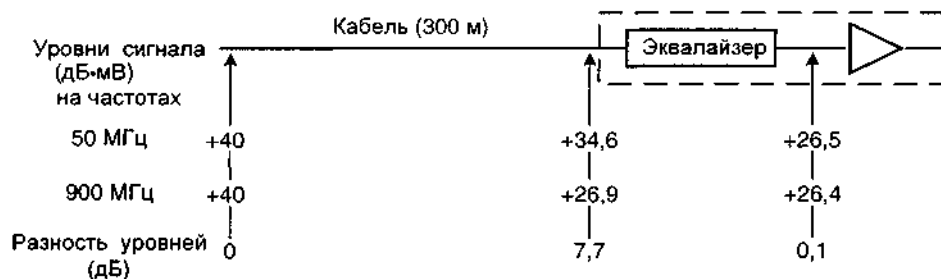


Рис. 4.8. Участок с выравниванием на выходе

На рис. 4.8 показан участок кабеля длиной 300 м и обозначены уровни сигналов для обеих частот 50 МГц и 900 МГц во всех точках кабеля. В этом примере входные уровни сигналов равны +40 дБ·мВ. На входе усилительного устройства разность уровней сигналов 50 МГц и 900 МГц составляет 7,7 дБ. Следовательно, необходимо установить здесь эквалайзер, который будет вносить ту же величину потерь в сигнал частоты 50 МГц с более высоким уровнем, учитывая, что сигнал частоты 900 МГц тоже будет испытывать некоторые незначительные потери. На выходе эквалайзера эти сигналы имеют примерно одну и ту же амплитуду (на входе усилителя различие уровней составляет только одну десятую децибела).

Эквалайзер можно рассматривать просто как обратный эквивалент кабеля заданной длины. Так, в этом примере эквалайзер на 13 дБ является обратным эквивалентом кабеля длиной около 300 м в полосе 900 МГц. Такой кабель имеет потери 5,3 дБ на частоте 50 МГц и 13 дБ на частоте 900 МГц. Эквалайзер же будет вносить потери примерно 8,1 дБ на частоте 50 МГц и 0,4 дБ на частоте 900 МГц. В связи с этим важно понимать, как производитель определяет характеристику эквалайзера в спецификации. В только что приведенном примере значение потерь 13 дБ не фигурирует в спецификации эквалайзера ни на одной из частот данного диапазона, тем не менее, он предназначен для выравнивания характеристики именно этого кабельного участка.

4.4. Предкоррекция АЧХ на входе усилительного участка

Целью создания любой системы КТВ является предоставление информационных услуг абонентам с высоким качеством. Все принимаемые телевизионные сигналы должны иметь уровни, достаточные для воспроизведения каждым абонентским телевизионным приемником качественного изображения. Кроме того, все распространяемые сигналы должны иметь одинаковые уровни, чтобы телевизионный приемник мог одинаково хорошо принимать сигналы всех каналов. На практике частотная характеристика кабеля часто становится ограниче-

нием для обеспечения хорошего качества обслуживания. Обеспечить равные уровни сигналов во всех оконечных точках сложной и разветвленной распределительной кабельной системы не представляется возможным.

До сих пор рассматривался наклон спектра только в связи с характеристиками кабеля, не учитывая наличие в системе абонентских ответвителей. На выходах абонентских ответвлений, подключенных к ответвителям, наклон спектра передачи также должен находиться в допустимых границах. Однако, особенность абонентского участка состоит в том, что на выходе абонентских ответвлений спектр не нужно выравнивать, поскольку принимается во внимание допустимый динамический диапазон, который установлен стандартами систем КТВ для конечной абонентской точки. Необходимость использования кабелей различных длин, включая сами абонентские ответвления, для обслуживания множества оконечных точек не позволяет точно отрегулировать уровни сигналов. Поэтому частично компенсация этого отклонения уровней возлагается на само обслуживаемое оконечное устройство, т.е. телевизор, который обладает некоторым динамическим диапазоном входного уровня и допускает небольшое отклонение уровня сигнала без ухудшения качества изображения. Следовательно, при проектировании распределительной сети нужно найти компромисс между необходимостью обслуживания большого числа оконечных точек и требованием выравнивания уровней сигналов, вводя ограничение на отклонение уровня, которое допускается в подаваемых на телевизионные приемники сигналах.

Новый ГОСТ Р52023-2003 регламентирует величину неравномерности АЧХ от входа линейного тракта до выхода абонентской розетки кабельной распределительной сети во всей полосе частот. Разность уровней напряжения радиосигналов изображения должна составлять:

- в полосе 40...1000 МГц – не более 15 дБ;
- в полосе 40...600 МГц – не более 12 дБ;
- в полосе 40...300 МГц – не более 10 дБ;
- в любой полосе 100 МГц – не более 7 дБ;
- в смежных каналах – не более 3 дБ.

Согласно стандарту CENELEC EN-50083 диапазон отклонения уровней сигнала на входе абонентской розетки должен быть не более 12 дБ во всей полосе рабочих частот и не более 6 дБ в любом диапазоне ширины 60 МГц внутри рабочей полосы. Это значит, что для всех сигналов на входе абонентского телевизионного приемника разность между максимальным и минимальным значениями должна находиться в пределах 12 дБ.

Благодаря наличию этого разрешенного диапазона, разработчик получает возможность повысить эффективность и экономичность сети за счет того, что на выходах ответвлений кабельного участка наклон будет выравниваться не полностью, а частично. Вопрос заключается только в том, насколько сильный наклон следует допускать на выходе ответвления. Здесь нужно учитывать, что на пути до конечной абонентской точки сигнал проходит еще кабельный участок домовой распределительной сети, в котором наклон опять несколько увеличивается. При выбранном допустимом наклоне разработчик должен следить за тем, чтобы наклон спектра передачи в абонентской точке (согласно используемому стандарту) не выходил за его пределы. Зачастую разработчики кабельных систем устанавливают более жесткий динамический диапазон, около 9 дБ. Поскольку заранее разработчик не может знать, какими будут длины аби-

нентских ответвлений, то принято делать диапазон более узким, чтобы гарантировано не выйти за рамки, установленные стандартами для абонентских точек. Однако, для определения допустимого наклона на выходе ответвлений необходимо руководствоваться какими-то данными. Обычно используют метод определения средней длины абонентских ответвлений. В этом случае требуется зафиксировать уровень сигнала в окончании кабельного ответвления, чтобы можно было определить и уровень сигнала на входе каждого ответвителя.

Предположим, что требуется использовать для абонентского ответвления кабель RG-59, который имеет потери 5 дБ на 100 м на частоте 50 МГц и соответствующие потери 12 дБ на 100 м на частоте 900 МГц. Допустим, требованиями технического задания установлено, что большинство абонентских ответвлений имеют длину 50 м. Потери в таких абонентских ответвлениях будут составлять 2,5 дБ на частоте 50 МГц и 6 дБ на частоте 900 МГц. Если теперь примем, что допустимое отклонение сигнала в окончании любого абонентского ответвления составляет +3 дБ, то должны будем обеспечить на выходе ответвителя уровень по крайней мере +8,3 дБ·мВ на частоте 900 МГц. Как правило, такое значение округляется до +10 дБ·мВ, что позволит с уверенностью обеспечить нахождения уровней в допустимом диапазоне. Выбранный нами абонентский участок кабеля создает наклон характеристики 3 дБ ввиду разности потерь на частоте 50 МГц и 900 МГц. Следовательно, допустимый диапазон для оконечной точки ответвления (в этом примере взято значение 9 дБ) должен быть меньше на 3 дБ, т.е. составлять 6 дБ. Исходя из этого, разработчик должен выбирать такие ответвители, в спецификациях которых указано, что уровень на его выходном порте составляет +10 дБ·мВ (для данного примера) или выше на частоте 900 МГц, при диапазоне отклонений уровня не более 6 дБ.

Эффективным способом поддержания наклона в допустимых границах является введение в начале кабельного участка предварительного наклона, обратного наклону частотной характеристики кабеля. Иначе говоря, это способ подразумевает предварительное и намеренное линейное искажение спектра передачи, при котором уровень сигнала высокой частоты делается выше уровня сигнала низкой частоты. Этот метод также называется методом предкоррекции наклона спектра передачи. Для пояснения рассмотрим два примера, в одном из которых предкоррекция не обеспечивается, а в другом она присутствует.

На рис. 4.9 показан участок кабеля длиной 200 м с равными амплитудами входных сигналов +40 дБ·мВ частот 50 МГц и 900 МГц. Значения уровней и длины кабеля взяты произвольно. На участке последовательно включены три ответвителя на расстоянии 50 м друг от друга, и каждый ответвитель отводит сигнал в ответвление длиной 30 м. Уровни передачи показаны на входе каждого ответвителя для сигналов верхней и нижней частоты спектра. Кроме того, можно видеть различие уровней этих сигналов как на входе, так и на выходе ответвления.

В точке включения первого ответвителя величина наклона полностью укладывается в установленный динамический диапазон 9 дБ для абонентского окончания (разность уровней составляет 6,8 дБ), но в точках расположения других ответвителей уровни оказываются за пределами спецификации (разности 10,8 дБ и 14,2 дБ). Заметим, что для самого ответвителя спецификация определяет величину допустимого наклона в 6 дБ на каждом выходе, а уровни сигналов в этих точках равны соответственно +7,8 дБ·мВ и +11,6 дБ·мВ. Следовательно, на выходах ответвителей (на входах ответвлений) спецификация не

4.4. Предкоррекция АЧХ на входе усилительного участка

нарушается. В то же время уже на выходах второго и третьего ответвления наклон выходит за пределы разрешенных 9 дБ, не говоря о конечной абонентской точке, где он становится недопустимо большим.

На рис. 4.10 показана та же система при тех же потерях в ответвлениях и тех же спецификациях, но спектр сигналов на входе кабеля имеет предварительный наклон 8 дБ. Несущая частоты 50 МГц имеет уровень +32 дБ·мВ, но уровень несущей на частоте 900 МГц остается равным +40 дБ·мВ. Уровни всех других сигналов, находящихся между этими граничными частотами, постепенно увеличиваются с ростом частоты в линейной зависимости. Поскольку уровни сигналов здесь не увеличиваются, то такой наклон создает максимальное затухание для частоты 50 МГц и нулевое для частоты 900 МГц. Не будем сейчас останавливаться на способах получения этого наклона. По результатам расчетов, представленным на рисунке, можно убедиться, что теперь все три ответвления соответствуют спецификации по величине допустимого диапазона уровней, как для выхода ответвителя, так и для выхода ответвления. Видно, что наклон выровнен не полностью, но при таких незначительных остаточных значениях наклона (1,2 дБ и 2,7 дБ) можно с высокой долей уверенности полагать, что при разумной длине абонентского кабеля в абонентской точке наклон не превысит разрешенных 9 дБ (разумеется, это также необходимо будет проверить).

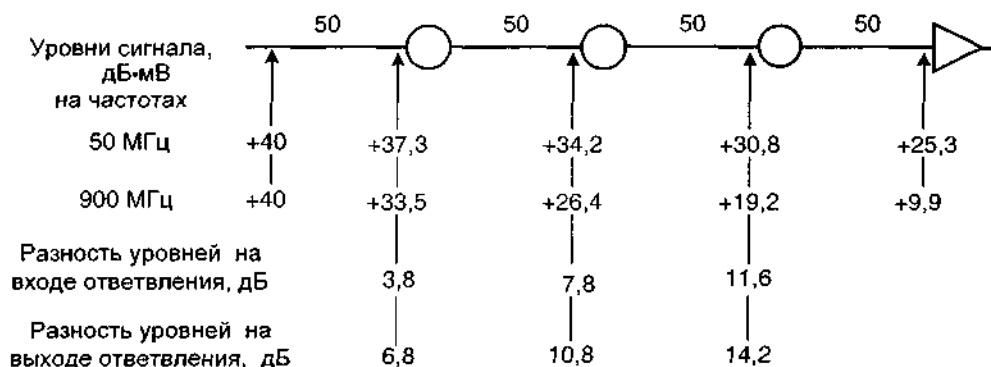


Рис. 4.9. Участок без выравнивания

Проследим весь процесс вычислений в этом примере. Потери на главном кабельном маршруте считаем равными 5,4 дБ/100 м на частоте 50 МГц и 13 дБ/100 м на частоте 900 МГц. Тогда каждые 50 м кабеля будут вносить потери 2,7 дБ на частоте 50 МГц и 6,5 дБ на частоте 900 МГц. На входе кабельного участка уровень составляет +32 дБ·мВ на частоте 50 МГц и +40 дБ·мВ на частоте 900 МГц. Следовательно, уровень на входе первого ответвителя равен $+32 - 2,7 = 29,3$ дБ·мВ на частоте 50 МГц и $+40 - 6,5 = +33,5$ дБ·мВ на частоте 900 МГц. Если в данной точке должно быть расположено два ответвления, то следует взять ответвитель с двумя портами. Обращаясь к приведенной выше таблице с параметрами ответвителей, найдем, что ответвитель с двумя портами будет вносить потери 0,4 дБ в главный кабель. Значит, сигналы будут иметь

в этой точке уровень +28,9 дБ·мВ на частоте 50 МГц и +33 дБ·мВ на частоте 900 МГц.

Чтобы обеспечить на входе абонентского ответвления уровень +10 дБ·мВ, взят ответвитель с номиналом 23 дБ. Поэтому на входе абонентского ответвления уровень сигнала будет на 23 дБ ниже, чем на входном порте ответвителя. Тогда уровень сигнала будет равен +10,5 дБ·мВ на частоте 900 МГц и +6,3 дБ·мВ на частоте 50 МГц. Разность между этими уровнями составляет 4,2 дБ, что и показано на рисунке. Кабель абонентского ответвления вносит потери +2,5 дБ на частоте 50 МГц и +5,5 дБ на частоте 900 МГц. Поэтому сигналы, приходящие в точку абонентского окончания будут иметь уровень +3,8 дБ·мВ на частоте 50 МГц и +5 дБ·мВ на частоте 900 МГц. Разность между этими уровнями составляет 1,2 дБ, как показано на рисунке. Далее процесс продолжается таким же образом.

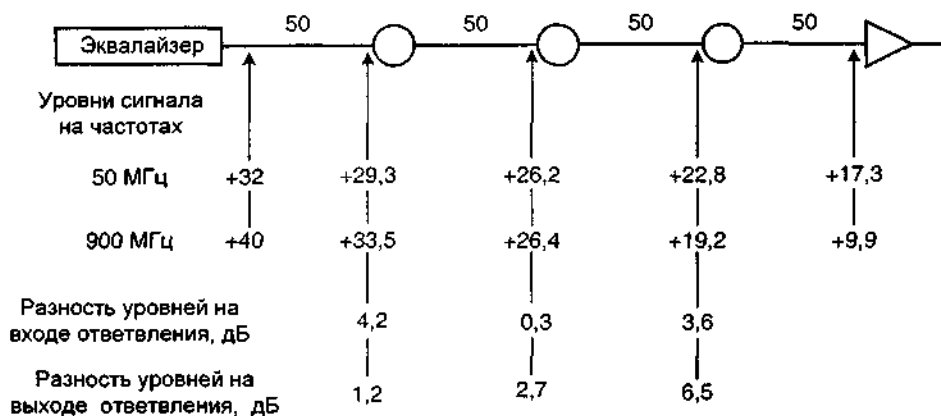


Рис. 4.10. Участок с предварительным выравниванием

Для равномерного распределения уровней сигналов на участке последней мили между абонентами частот используют описанный способ предварительного выравнивания АЧХ на входе кабельного участка. Однако, в сложной и разветвленной домовой распределительной сети выравнивание, как правило, выполняется только в ограниченном количестве точек. Более рациональным является применение абонентских ответвителей, выполняющих одновременно функции кабельных эквалайзеров. В такие ответвители имеет разный наклон частотно-зависимого ослабления на отвод в зависимости от величины ответвляемого сигнала, а также слабо выраженный наклон и потери на проход. Такое рациональное решение позволяет выровнять уровни сигналов в разумных пределах по всем абонентам.

В протяженных кабельных сетях, включающих несколько следующих друг за другом кабельных участков, на каждом из которых включен свой эквалайзер, обнаруживается эффект влияния АЧХ эквалайзеров на АЧХ кабельной сети. Зачастую даже при соблюдении всех описанных выше условий выравнивания спектра передачи оказывается, что в действительности амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи кабельной сети имеет большую неравномерность, чем та, которую рассчитывал получить разработчик. Это объ-

ясняется невозможностью учета в расчетах разных случайных факторов, к которым относится плохое согласование электрических параметров оборудования, низкое качество монтажа и разделки кабельных разъемов. Пожалуй, главной причиной неравномерности АЧХ коэффициента передачи является несоответствие частотных характеристик затухания эквалайзеров и тех участков кабеля, на которых устанавливаются эти эквалайзеры. Это означает, что невозможно добиться идеально точного совпадения характеристики кабеля и обратной характеристики эквалайзера, при котором спектр передачи становится ровным, как показано на рис. 4.6. Рассмотрим влияние АЧХ эквалайзеров на примере магистральной сети.

Допустимое значение неравномерности АЧХ коэффициента передачи сети КТВ определено стандартом EN-50083. В соответствии с ним разность уровней несущих изображений в полосе частот 47 – 1000 МГц на выходе любой абонентской розетки не должна превышать 12 дБ, т.е. неравномерность АЧХ от выхода центральной головной станции до входа телевизора не должна превышать значения ± 6 дБ. Магистральная сеть состоит из участков соединительного кабеля, частотно-независимых ответвителей и магистральных усилителей, имеющих в своем составе сменные частотные эквалайзеры с рабочим затуханием до 18 дБ. Поскольку неравномерность АЧХ пассивных приборов обычно не превышает 1 дБ, а неравномерность АЧХ магистральных усилителей обычно не превышает 2 дБ, этими величинами можно пренебречь. Гораздо большую неравномерность вносят сами эквалайзеры. Реальную неравномерность, получаемую после выравнивания АЧХ магистрали с помощью эквалайзеров, можно вычислить методом минимизации среднеквадратического отклонения суммарной характеристики соединительных кабелей и эквалайзеров.

Возможная длина магистрали зависит от максимально допустимого суммарного наклона АЧХ магистрального кабеля на рабочих частотах. В связи с этим в сетях КТВ неравномерность АЧХ может стать фактором, ограничивающим длину магистрали. Если не применять специальных мер по улучшению равномерности АЧХ коэффициента передачи магистрали, максимальная величина наклона в магистральной сети, даже при установке эквалайзеров с правильно рассчитанным диапазоном выравнивания, может превышать допустимые 12 дБ. Эти меры могут заключаться в более тщательном подборе параметров эквалайзеров с одновременными измерениями результирующей АЧХ коэффициента передачи всей магистрали. Применяя высококачественные эквалайзеры, можно увеличить количество усилителей в магистральном каскаде от обычного количества 6...8 до 10...12, но при этом, разумеется, необходимо контролировать уровни шума и интермодуляции, о чем пойдет речь в следующих главах.

Резюме

Основной частотной характеристикой для любого компонента кабельной системы является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Вид кривой АЧХ определяет величину усиления или затухания прибора на любой частоте в пределах его рабочей полосы частот. Применительно ко всей кабельной системе говорят о частотной зависимости коэффициента передачи, получаемой в результате сложения АЧХ всех компонентов системы. Амплитудное искажение спектра передачи объясняется физическими свойствами коаксиального кабеля. С хорошей степенью точности затухание в кабеле можно считать зависящим от квадратного корня из частоты. Частотные свойства других компонентов кабель-

ной сети (активных и пассивных приборов) выражены гораздо слабее, и ими можно пренебречь.

Наклон спектра передачи необходимо выравнивать на каждом кабельном участке для улучшения рабочих показателей всей системы путем введения наклона обратного характера. Для выравнивания спектра в кабельных сетях используются эквалайзеры, характеристика затухания которых в общем случае также нелинейно зависит от частоты. Наклон может корректироваться на выходе кабельного участка, когда эквалайзер включается перед усилительным устройством или методом предкоррекции, когда эквалайзер включается на входе кабельного участка после усилительного устройства. Величина предварительного наклона может сильно различаться в зависимости от количества используемых ответвителей. Она возрастает, например, в распределительном фидерном кабеле городской сети, или, если используется кабель с более высокими потерями или если используются усилители с меньшим усилением. При определении необходимой величины предварительного наклона должны учитываться все эти факторы, но наиболее существенна зависимость этой величины от верхней частоты передачи. Для верхней частоты 1000 МГц она может достигать 15 дБ...18 дБ.

Частотные характеристики потерь в широкополосных системах требует серьезного внимания и проведения серии расчетов. Необходимо учитывать, что несоответствие частотных характеристик КВ и кабеля способно вносить существенный вклад в неравномерность АЧХ КП магистральной сети. Изложенный подход применим к любому участку кабельной системы, независимо от ширины полосы системы передачи и количества пассивных и активных приборов в ней.

ШУМЫ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В этой главе описаны виды шумов в кабельной системе передачи, проявление шума в телевизионном изображении, механизмы возникновения шумов, способы оценки шума в цифровых и аналоговых системах. Сначала будут рассмотрены показатели, с помощью которых характеризуется шум отдельного устройства, а затем методы расчета шумовых показателей кабельной системы в целом.

Обратите внимание, что в этой и последующих главах рассматриваются каскады усилителей, протяженность которых заведомо выше протяженности реальных систем. Это делается лишь в учебных целях, чтобы показать поведение качественных характеристик системы в экстремальных условиях.

5.1. Природа шума

Понятие “шум” применяется ко всему, что маскирует полезный сигнал. В самом широком смысле шум представляет собой случайный сигнал (помеху), поведение которого трудно предсказать. Помеха может оказаться в любом участке спектра и иметь любую амплитуду. Источниками шума в кабельных сетях являются, главным образом, активные устройства. В коаксиальных системах передачи к ним относятся, магистральные и домовые усилители, а также антенные усилители и усилительное оборудование головных станций (центральной и узловых). В оптических системах передачи источниками шума являются оптические передатчики и приемники. Шум в коаксиальных системах существенно больше, чем в оптических, что связано с самим принципом их построения, поэтому далее мы, в основном, будем рассматривать явление шума в коаксиальных системах. Однако, полностью оптических систем пока не существует, а современные системы строятся по принципу сочетания коаксиальной и оптической структур в одной системе. В оптической части все равно нужно учитывать шум, вносимый устройствами преобразования оптических сигналов в электрические и наоборот, а также шум неотъемлемого элемента любой системы передачи – головной станции. Шум антенных усилителей и головных станций является определяющим параметром для числа абонентов кабельной сети. В коаксиальной части шумы магистральных и домовых усилителей накладывают ограничение на протяженность области обслуживания сети. Появление шума в кабельной системе передачи тесно связано с двумя факторами – естественным затуханием сигнала при передаче по физической среде и внешними электромагнитными наводками в коаксиальном кабеле и оборудовании. Вторая проблема решается с помощью высокого экранирования кабеля и оборудования, а также частотного планирования, о котором говорилось во второй главе. В этой главе нас будет интересовать шум, связанный с затуханием сигнала при передаче в кабеле. Механизм его возникновения состоит в следующем.

Любой элемент кабельной системы передачи, обладающий внутренним резистивным сопротивлением R (делитель сигнала, аттенюатор или усилитель), генерирует собственный тепловой шум, возникающий из-за хаотических колебаний электронов внутри проводящего материала. Среднеквадратическое (эфффективное) значение амплитуды этого шума в вольтах для каждого телевизионного канала определяется формулой:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{P_{\text{ш}} R}.$$

В этой формуле $P_{\text{ш}}$ – это так называемая шумовая мощность (в ваттах), передаваемая в нагрузку R , которая вычисляется по формуле:

$$P_{\text{ш}} = kT_{\text{ш}}\Delta f,$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), $T_{\text{ш}}$ – эквивалентная шумовая температура элемента системы (в градусах Кельвина), Δf – полоса телевизионного канала до входа демодулятора.

Заметим, что для системы, в которой полное входное сопротивление (импеданс) прибора во много раз больше сопротивления источника сигнала ($Z_{\text{вх}} \gg R_{\text{и}}$) шум будет в четыре раза выше. Но, поскольку, в кабельных сетях действует условие согласования сопротивлений источника сигнала и прибора ($Z_{\text{вх}} = R_{\text{и}} = R_0$), мощность шума определяется данным выражением. Стандартное сопротивление для коаксиальных сетей, напомним, равно 75 Ом.

Шумовая температура зависит от собственных физических характеристик конкретного устройства и может изменяться в широких пределах. Так, шумовая температура пассивных устройств и кабеля равна температуре окружающей среды (например, средней температуре T_0 , которая равна 293 К)

$$T_{\text{ш0}} = T_0.$$

Для определения шумовой температуры передающих антенн наземного ТВ вещания можно пользоваться формулой, полученной опытным путем:

$$T_{\text{шA}} = \frac{T_0}{2} \left[100 \left(\frac{50}{f_{\text{из}}} \right)^2 + x \right],$$

где $f_{\text{из}}$ – частота несущей изображения, МГц, x – коэффициент, равный 1 для антенн типа “волновой канал” и равный 1,5 для логопериодических антенн. Шумовая температура передающих антенн наземного ТВ вещания может составлять от 290 до 10000 К. Шумовая температура передающих антенн спутникового ТВ вещания составляет от 40 до 100 К.

Шумовая температура усилительных устройств учитывает так называемый коэффициент шума F (в дБ), который характеризует уровень собственных шумов усилителя по отношению к суммарному шуму усилителя (определение коэффициента шума F дано далее), и определяется следующей формулой:

$$T_{\text{ш.ус}} = T_0(10^{F/10} - 1).$$

Коэффициент шума может измеряться не только для усилителей, но также и для пассивных устройств.

Природа собственного теплового шума прибора такова, что он не зависит от частоты, т.е. шум представлен во всем рассматриваемом нами спектре с одинаковой амплитудой. На экране осциллографа такой шум выглядит как сигнал с очень широким спектром и примерно постоянным уровнем по всей ширине полосы. Такой шум называется "белым". Чем шире полоса передачи, тем больше шума вносит прибор, но нужно учитывать шум не во всей полосе частот системы передачи, а только в той полосе, для которой происходит усиление сигнала. Поскольку полоса ТВ канала ограничена 6 МГц (OIRT), то на телевизионный сигнал будет оказывать влияние только шум, находящийся в этой полосе. На самом деле эта полоса еще меньше, поскольку нас интересует только полоса видео сигнала (или полоса аудио сигнала) в отдельности. Для сигналов системы SECAM эта полоса равна 5,75 МГц, для сигналов системы PAL она равна 4,75 МГц. Для разработчика важно то, что доля шума, вносимого усилителями в широкополосных коаксиальных системах, не зависит от количества передаваемых ТВ каналов.

Применительно к технологии кабельных сетей величина напряжения (или мощности) шума является одним из важнейших показателей качества передачи, а, следовательно, и качества изображения. Однако, в расчетах систем передачи, гораздо более удобно использовать не действительное значение мощности или напряжения шума, а отношение амплитуды полезного сигнала к амплитуде шума в той части спектра, где находится полезный сигнал. Это отношение называется показателем сигнал-шум или несущая-шум.

5.2. Показатели шума S/N и C/N

Главным количественным показателем, с помощью которого оценивают величину шума любого устройства или элемента системы передачи, является отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе или входе этого устройства или элемента. Это отношение называют отношением "сигнал-шум" (Signal-Noise, S/N). Поскольку обе мощности измеряются в одной точке, определение S/N сводится к отношению напряжений:

$$S/N = 10 \lg \frac{P_{oc}}{P_{ш}} = 10 \lg \frac{U_{oc}^2}{U_{ш}^2}$$

где P_{oc} – мощность немодулированного сигнала, а $P_{ш}$ – мощность шума в спектре передачи, U_{oc} – эффективное (среднеквадратическое) напряжение немодулированного полезного сигнала в вольтах, $U_{ш}$ – эффективное (среднеквадратическое) напряжение шума в вольтах. Получаемое отношение измеряется в децибелах. Отношение S/N показывает, во сколько раз (или на сколько децибел) уровень сигнала выше, чем уровень шума в одной и той же точке системы передачи.

Чаще разработчик пользуется другим шумовым показателем. При проектировании системы разработчик обычно имеет дело с шумом, который попадает в спектр передачи ВЧ несущих, модулируемых первоначальным низкочастотным сигналом (например, аудио и видеосигналом телевидения). В таких случаях вычисляется отношение амплитуды ВЧ несущей к амплитуде шума, называемое отношением несущая-шум (Carrier-Noise, C/N). При демодуляции ВЧ сигнала в ТВ приемнике, когда восстанавливается исходный телевизионный сигнал, следует рассчитывать отношение S/N, чтобы определить долю шума,

содержащегося в восстановленном сигнале, а для определения шума в канале передачи следует рассчитывать отношение C/N . Таким образом, различие между показателями S/N и C/N состоит только в том, что C/N является по определению отношением между немодулированным сигналом и шумом, а S/N является по определению отношением между модулированным сигналом и шумом. Формула расчета отношения C/N аналогична той, что была приведена для S/N :

$$C/N = 10 \lg \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}.$$

Только теперь P_c – это мощность модулированного сигнала или ВЧ несущей, а $P_{\text{ш}}$ – мощность шума в спектре передачи данной ВЧ несущей. Отношение C/N всегда измеряется в децибелах.

Отношение C/N , как и S/N , определяется для уровней сигнала и шума, измеренных в одной и той же полосе спектра передачи. Чем шире полоса, тем больше шумовое напряжение, как следует из приведенной выше формулы для $U_{\text{ш}}$. Следовательно, чтобы вычислить отношения S/N или C/N в полосе одного телевизионного канала, необходимо знать амплитуды сигнала и шума в полосе 5,75 МГц (или 4,75 МГц для системы PAL). Полосу, в которой измеряются уровни сигнала и шума, важно учитывать, поскольку белый шум имеет непрерывный спектр и при расширении полосы энергия шума увеличивается, а энергия сигнала остается постоянной.

Существует связь между отношениями S/N и C/N . Чтобы демодулятор мог уверенно различать несущую и шум принято, что для любого требуемого на выходе системы значения S/N значение C/N радиочастоте должно быть больше, по крайней мере, на 4 дБ. Таким образом, система КТВ, обеспечивающая значение C/N , скажем, 44 дБ, будет обеспечивать значение S/N 40 дБ для любого демодулированного сигнала, который был передан по этой системе.

Приступая к проектированию, обозначают те контрольные точки кабельной системы, в которых будут измеряться показатели шума, а также другие ее характеристики. Такие точки могут находиться вдоль всего маршрута кабеля, но важнейшие показатели измеряются на выходе головной станции, на выходе усилительного каскада магистральной сети и на выходе абонентской розетки, т.е. там, где действуют главные источники шумов и искажений. Поскольку сигналы, проходящие через систему КТВ во всех этих точках, являются модулированными на ВЧ, то при проектировании сети практически всегда будет использоваться расчетный показатель C/N .

Для расчетов отношений C/N кабельных сетей амплитуду шумового напряжения, также как и амплитуду напряжения сигнала, выражают в каких-либо относительных единицах (в дБ·мВ или дБ·мкВ). Поскольку абсолютные значения шумового напряжения в кабельных сетях измеряются тысячными долями вольта, для расчетов используют единицы децибел-микровольт (дБ·мкВ), к которым преобразуют напряжения сигнала и шума с помощью формулы:

$$S_{(\text{дБ·мкВ})} = 20 \lg \frac{U}{10^{-6} \text{ В}} \quad (\text{относительно } 1 \text{ мкВ}).$$

Но встречается и использование единиц децибел-милливольт (дБ·мВ), к которым преобразуют напряжения сигнала и шума с помощью формулы:

$$S_{(\text{дБ-мВ})} = 20 \lg \frac{U}{0,001 \text{ В}} \quad (\text{относительно } 1 \text{ мВ}).$$

Первой формулой удобно пользоваться, если абсолютное напряжение задано в микровольтах, а второй – если абсолютное напряжение задано в милливольтках. Правильность вычислений можно контролировать с помощью простого правила – разность между этими двумя значениями всегда должна быть равна 60 (см. гл. 2).

Пользуясь относительными уровнями, можно легко вычислять шумовые показатели системы. Вспомним правило расчета разности между двумя уровнями, заданными в относительных единицах:

$$\Delta S_{(\text{дБ})} = S_2 - S_1.$$

Исходя из него, преобразуем формулу расчета отношения C/N к более удобному виду:

$$C/N = S_c - S_{\text{ш}},$$

где S_c , $S_{\text{ш}}$ – относительные уровни сигнала и шума соответственно (в дБ·мВ или дБ·мкВ). Согласно этой формуле, используемой во всех дальнейших расчетах шума, разность между уровнем сигнала на выходе элемента системы и уровнем его шумового напряжения в децибелах является отношением сигнала к шуму.

Найдем абсолютный и относительные уровни шумового напряжения пассивного устройства при средней температуре окружающей среды.

$$U_{\text{ш}0} = \sqrt{kT_0 \Delta f R} = \sqrt{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 5,75 \cdot 10^6 \cdot 75} = 1,32 \text{ мкВ}.$$

Выразим это значение в единицах дБ·мкВ для удобства последующих расчетов:

$$S_{\text{ш}0(\text{дБ-мкВ})} = 20 \lg \frac{\sqrt{kT_0 \Delta f R}}{10^{-6} \text{ В}} = 2,41 \text{ дБ} \cdot \text{мкВ}$$

Теперь выразим то же самое значение $U_{\text{ш}0}$ в других относительных единицах – дБ·мВ:

$$S_{\text{ш}0(\text{дБ-мВ})} = 20 \lg \frac{\sqrt{kT_0 \Delta f R}}{10^{-3} \text{ В}} = -57,8 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}$$

Этот уровень, который можно определить любым из данных трех способов, является минимальным уровнем шумового напряжения для одного телевизионного канала. Округлив рассчитанные значения, можно записать:

$$S_{\text{ш}0} = 2,4 \text{ дБ} \cdot \text{мкВ} = -58 \text{ дБ} \cdot \text{мВ}.$$

Этот уровень шума можно также назвать шумовым порогом или входным шумом источника сигнала, так как он присутствует постоянно на входе любого устройства в любой коаксиальной кабельной системе передачи. Никакое реальное устройство не может иметь на своем выходе шум, напряжение которого

ниже порогового. Шумовой порог является очень важным параметром для расчета отношения сигнал-шум, поскольку он, в частности, определяет минимальный допустимый уровень полезного сигнала в сети. Задачей кабельной системы является передача сигнала на довольно большие расстояния, часто измеряемые километрами. Если при большой протяженности среды передачи уровень входного сигнала будет недостаточно высок, затухание может стать очень большим. При некотором затухании, входной сигнал будет иметь ту же амплитуду, что и тепловой шум. В этом случае, согласно приведенной выше формуле для C/N , отношение сигнал/шум будет равно нулю, т.е. сигнал станет неразличимым на фоне шума.

Показатель C/N может задаваться для любого устройства или элемента кабельной сети, но, строго говоря, основными источниками шума в кабельной сети являются усилители. Заметим, что показатель C/N может измеряться как для входа, так и для выхода устройства – важно, что напряжение шума и напряжение сигнала должны измеряться в одной точке. Хотя измеряется показатель C/N на выходе устройства, обычно напряжение шума относится ко входу устройства, где действует минимальное шумовое напряжение $U_{ш0}$. Общий входной шум источника сигнала и самого усилителя описывается через эквивалентное напряжение шума на входе, которое могло бы создать на выходе наблюдаемый шум.

Это имеет смысл тогда, когда требуется оценить шум, добавленный усилителем к шуму источника сигнала (независимо от коэффициента усиления усилителя), что вполне оправдано, поскольку основной шум усилителя порождается его входной ступенью, которая имеет слабое усиление. Очевидно, для приборов кабельной сети источником сигнала является коаксиальная кабель. Часто разработчик пользуется и выходным отношением C/N усилителя, которое также называется приведенным динамическим диапазоном, поскольку учитывает еще и его усиление. Этот показатель удобно использовать в расчетах отношения C/N каскада из нескольких последовательно включенных усилителей. Далее рассмотрим подробнее, чем определяется показатель шума отдельного усилительного устройства.

5.3. Шум усилителя

Затухание сигнала, как уже известно, измеряется в децибелах и уровень сигнала на выходе элемента системы передачи находится вычитанием величины затухания L из уровня входного сигнала:

$$S_{\text{вых}} = S_{\text{вх}} - L.$$

Затухание сигналов, передаваемых по кабельным коаксиальным системам, можно и необходимо компенсировать включением в систему усилителей с усилением, равным затуханию на участке сети:

$$S_{\text{вых}} = S_{\text{вх}} + K, \quad K = L.$$

Любой усилитель, вместе с усилением сигнала, усиливает и шум в канале ровно на ту же величину, на которую он усиливает полезный сигнал, т.е., если в сигнале на входе усилителя присутствует шум с некоторой амплитудой $U_{ш}$, то на выходе этот шум возрастет на K децибел. Однако, чем выше уровень полез-

ного сигнала, подаваемого на вход усилителя, тем менее значимым будет создаваемый им шум. Кроме того, усилитель генерирует и собственный тепловой шум, величина которого характеризуется коэффициентом F .

Коэффициентом шума усилителя (Noise Figure, F) называется отношение уровня выходного шума реального усилителя к выходному шуму идеального (не шумящего) усилителя с тем же коэффициентом усиления, причем входным шумом в обоих случаях является минимальное (пороговое) шумовое напряжение $U_{ш0}$. Иначе говоря, коэффициент шума – это отношение суммарной мощности шума на выходе усилителя к той доле мощности шума, которая обусловлена тепловым шумом источника сигнала $U_{ш0}$. Отсюда следует, что F не зависит от нагрузки усилителя, но зависит от сопротивления источника шума и шумовых свойств самого усилителя.

$$F = \frac{U_{ш0}^2 + U_{ш}^2}{U_{ш0}^2},$$

где, как и ранее, $U_{ш0}^2 = kT_0\Delta f$.

Можно дать и другое определение F . Коэффициентом шума называется частное от деления отношения несущая-шум (C/N) на входе усилителя на отношение несущая-шум на выходе усилителя при условии отсутствия нелинейных искажений.

$$F = \frac{(C/N)_{вх}}{(C/N)_{вых}}$$

Этот показатель производитель обязательно указывает в спецификации усилителя. Как следует из определений, коэффициент шума – безразмерная величина и легко может быть выражен как размах, так и в децибелах. Обычно значение F , заданное в спецификации усилителя, выражено в децибелах. Соотношение между F и $F_{(дБ)}$ аналогично тем, что были получены для соотношения абсолютных и относительных уровней, с учетом того, что здесь вычисляется отношение по мощности:

$$F_{(дБ)} = 10 \lg F.$$

Из определений F понятно, что теоретический шум на выходе идеального усилителя (у которого собственный шум равен нулю) равен входному, т.е. составляет 2,4 дБ-мкВ (~57,6 дБ-мВ, что в расчетах обычно принимается за 58 дБ-мВ) в полосе одного ТВ канала в 75-омной системе передачи. Никакой реальный усилитель не может создавать шум ниже этого уровня. Следовательно, физический смысл коэффициента шума состоит в том, что он показывает, насколько близок собственный уровень шума отдельного усилителя к входному пороговому значению, или, другими словами, насколько уровень шума, генерируемый конкретным усилителем, выше, чем значение –58 дБ-мВ. Это соотношение показано на рис. 5.1.

Видно, что если заданное в спецификации значение F равно 8 дБ, т.е. уровень собственного шума усилителя на 8 дБ выше порогового значения и составляет –50 дБ-мВ. Очевидно, более низкое значение F означает более высокое качество усилителя, так как тогда амплитуда производимого им шума будет ниже, и следовательно, данный усилитель ближе к идеальному.

Усилитель с меньшим (лучшим) коэффициентом шума имеет более низкий собственный шумовой порог, что следует из определений и диаграммы на рис. 5.1. Например, если бы коэффициент шума был равен 7 дБ, то такой усилитель производил бы шум только на 7 дБ больший теоретического порога, т.е. -51 дБ·мВ.

По существу, коэффициент шума является характеристикой, эквивалентной шумовой температуре. Существует общая формула, связывающая коэффициент шума, заданный в децибелах, с шумовой температурой, заданной в градусах Кельвина, для любого устройства (активного или пассивного):

$$T_{ш.ус} = T_0(10^{F(\text{дБ})/10} - 1).$$

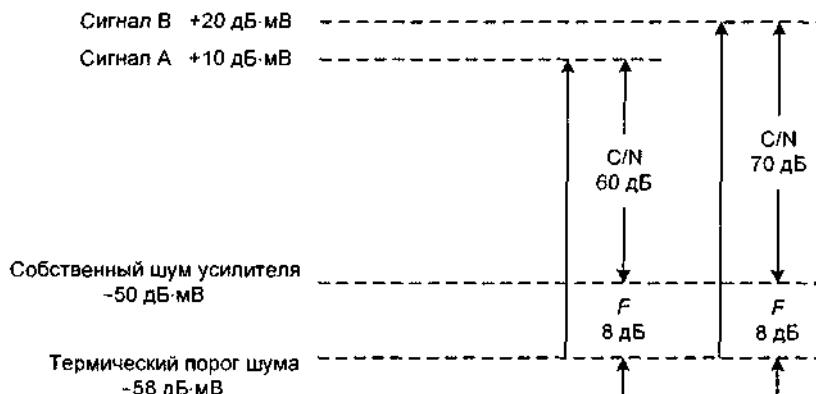


Рис. 5.1. Коэффициент шума

Если же значение F задано в разгах (безразмерно), то используют более простую формулу, которая дает тот же результат:

$$T_{ш.ус} = T_0(F - 1).$$

Выразив величину F через шумовую температуру, можно определить, что коэффициент шума пассивного прибора (или резистора) при средней температуре равен примерно 3 дБ. Из последней формулы следует, что шумовая температура усилителя может быть меньше средней температуры 293 К, что соответствует коэффициенту шума, меньшему, чем 3 дБ. Однако, стоимость таких малошумящих усилителей очень велика и реальные значения коэффициента шума усилителей, применяющихся в кабельных сетях, составляют 6 – 9 дБ. С другой стороны, коэффициент шума реального усилителя всегда больше, чем 1, т.е. больше 0 дБ. Коэффициент шума идеального устройства равен 1 или 0 дБ.

Таким образом, шум, создаваемый усилителем на выходе в общем случае зависит от трех факторов – входного (порогового) уровня шума $S_{ш0}$, коэффициента усиления K (дБ) и доли собственного вносимого усилителем шума, определяемого коэффициентом F (дБ):

$$S_{ш.вых} = S_{ш0} + K + F.$$

В соответствии с этим выходное отношение $C/N_{вых}$ (дБ), которое применительно к усилительным устройствам также называют *приведенным динамическим диапазоном*, определяется следующим образом:

$$C/N_{\text{вых}} = S_{\text{вых}} - S_{\text{ш.вых}} = S_{\text{вых}} - S_{\text{ш0}} - K - F.$$

Эта формула означает, что если на вход усилителя с коэффициентом шума F (дБ) и коэффициентом усиления K (дБ) от ВЧ генератора сопротивлением 75 Ом подать испытательный телевизионный сигнал некоторого уровня (дБ·мВ), то на выходе отношение сигнала к шуму будет определяться величиной $C/N_{\text{вых}}$ (дБ).

Выходной рабочий уровень сигнала $S_{\text{вых}}$, участвующий в формуле расчета $C/N_{\text{вых}}$, зависит в общем случае от величины интермодуляционных искажений, о которых пойдет речь в следующей главе.

Входное отношение $C/N_{\text{вх}}$ (дБ), которое учитывает только входной и собственный шум, будет определяться следующим образом:

$$C/N_{\text{вх}} = S_{\text{вх}} - S_{\text{ш.вх}} = S_{\text{вх}} - S_{\text{ш0}} - F,$$

где $S_{\text{вх}}$ – входной уровень сигнала (например в дБ·мВ), F – коэффициент шума усилителя, дБ.

Напомним, что входной уровень шума усилителя $S_{\text{ш0}}$ равен 2,41 дБ·мкВ (или –58 дБ·мВ).

Из последней формулы следует, что для реализации возможно большего $C/N_{\text{вых}}$ необходимо выбирать усилители с как можно большим уровнем выходного сигнала при минимальном коэффициенте усиления и минимальном коэффициенте шума. Однако при этом необходимо учитывать, что для данной протяженности магистрали применение усилителей с малым коэффициентом усиления приводит к увеличению их числа и, следовательно, к увеличению стоимости магистрали.

Допустим, что усилитель с коэффициентом шума 8 дБ имеет на входе сигнал с уровнем +5 дБ·мВ. Тогда создаваемое им отношение C/N можно вычислить так:

$$C/N_{\text{вх}} = +5\text{дБ}\cdot\text{мВ} + 58\text{дБ}\cdot\text{мВ} - 8\text{дБ} = 55\text{дБ}\cdot\text{мВ}.$$

Результаты расчетов можно представить в наглядном виде, построив номограмму, которая отражает соотношение всех трех факторов (F , C/N и уровня сигнала) – рис. 5.2. Приведем пример, который поможет яснее понять смысл этой характеристики. Предположим, что необходимо установить отношение C/N на уровне 57 дБ. Если у нас есть усилитель с коэффициентом шума 7 дБ, то номограмма покажет, что для этого необходимо обеспечить входной уровень сигнала +6 дБ·мВ. В этой ситуации усилитель, который имеет коэффициент шума 6 дБ, также можно использовать. Более того, если было бы возможным обеспечить входной сигнал с уровнем только +5 дБ, то при выборе такого усилителя это по-прежнему обеспечивало бы желаемое значение 57 дБ отношения C/N . Полученные результаты можно подтвердить и непосредственным измерением на оборудовании.

Как только выбор усилителя с определенным коэффициентом шума сделан, у разработчиков системы остается только один фактор, регулирующий уровень шума, вносимого усилителем в систему (поскольку теоретическое пороговое значение неизменно), и этим фактором является уровень сигнала на входе усилителя. Разработчик может изменять уровень входного сигнала и, таким образом изменяя отношение сигнал/шум, управлять уровнем в системе. Это наглядно показано на рис. 5.1.

Если установить входной сигнал на уровне +10 дБ·мВ (сигнал А), то разность или вернее отношение амплитуд входного сигнала и шума будет составлять 60 дБ. Если же разработчик установит уровень входного сигнала равным +20 дБ·мВ (сигнал В), то отношение амплитуд входного сигнала и шума будет равно 70 дБ.

Усилитель, однако, может работать в таких условиях, при которых будет не так важно, насколько хорошее значение коэффициента он имеет. Рассмотрим, ситуацию, когда усилитель, так расположен в системе, что на его входе всегда присутствует сигнал высокого уровня.

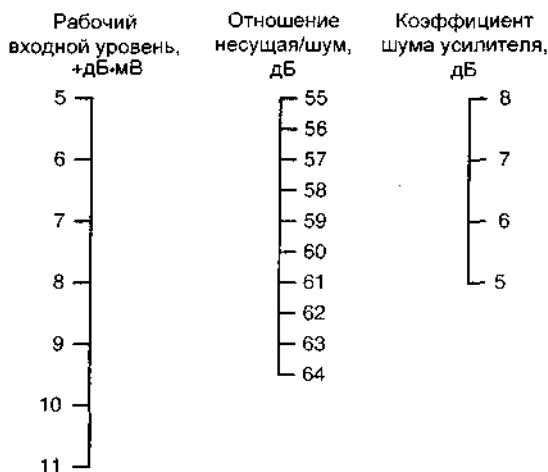


Рис. 5.2. Номограмма для расчета C/N

В этом случае отношение C/N может быть настолько хорошим, что разработчик может не обращать внимания на значение F усилителя без ущерба работе системы. При таких условиях выгоднее использовать усилитель с высоким F, поскольку это уменьшит затраты. С другой стороны, на участках системы, где требуется работать с очень низкими входными уровнями сигналов (такими как сигналы, от удаленных станций телевидения) может быть необходимо использование усилителей с наилучшими шумовыми характеристиками и высокие затраты на такие усилители будут неизбежны.

5.4. Расчет шума каскада усилителей

При построении кабельных систем любой значительной протяженности приходится объединять несколько усилителей в каскад для последовательного соединения отдельных элементов системы КТВ, например, магистральных кабельных участков. Посредством магистральных участков сигнал от головной станции, которая служит для приема, обработки и объединения (мультиплексирования) множества телевизионных сигналов, подается к домовым распределительным сетям. В процессе обработки сигналов на головных станциях также используются активные приборы, каждый из которых вносит свой шум. Очевидно, чем шире область обслуживания системы, тем больше в ней требуется уси-

лителей, каждый из которых вносит в сигнал свою долю шума. В каскаде включенных друг за другом усилителей эти доли шума будут складываться, и результирующий уровень шума будет тем выше, чем больше усилителей в системе. Сигнал при передаче через всю систему будет подвержен влиянию суммарного шума от всех источников шума, имеющихся в системе. Этот суммарный шумовой эффект может быть вычислен как отношение несущая-шум C/N для всей системы.

Можно предложить по крайней мере два подхода к расчету отношения C/N для всей системы передачи. Первый подход основан на комбинировании отдельных отношений C/N , характеризующих шумы разных частей системы, с помощью логарифмических диаграмм с целью получения общего (комбинированного) отношения C/N . Второй, аналитический, подход основан на использовании теоретических расчетных формул. Первый более применим для быстрых приближительных или оценочных расчетов каскадов, включающих большое количество усилителей, а второй может использоваться для более точных расчетов любых каскадов. Рассмотрим оба метода расчета подробнее.

Комбинирование является простым и удобным методом при сборке каскада из одинаковых блоков, которыми могут быть отдельные усилители с одинаковыми характеристиками или, в свою очередь, также каскады усилителей с одинаковыми характеристиками. При комбинировании некоторого количества таких блоков или усилителей общее отношение C/N получившейся системы меняется в логарифмической пропорции от количества блоков.

Диаграмма на рис. 5.3 изображает зависимость ухудшения отношения C/N каскада от количества усилителей в каскаде при равных показателях шума всех усилителей. Это означает, что все усилители создают шумы одинаковых мощностей при одинаковых входных уровнях сигналов. Так как шум рассматривается с точки зрения его мощности, то процедура комбинирования будет сводиться к сложению уровней по мощности. В основе диаграммы лежит правило, которое легко запомнить – при каждом удвоении количества усилителей в каскаде общее отношение C/N каскада уменьшается в два раза, т.е. на 3 дБ. Напомним, что уменьшение уровня мощности шума на 3 дБ означает снижение абсолютной мощности шума в два раза и вызывает повышение отношения C/N на 3 дБ при постоянном уровне входного сигнала. Значение C/N каскада определяется вычитанием величины, найденной по диаграмме (в дБ), из значения C/N одного блока. Мощность шума, генерируемого отдельным усилителем, легко определить по его спецификации тем способом, который был продемонстрирован в предыдущем параграфе. Мощность шума от двух усилителей, подключенных в каскад, будет определяться удвоенной мощностью шума каждого усилителя, если эти усилители абсолютно одинаковы и на их входы подаются сигналы равных уровней. Таким образом, при увеличении числа усилителей в каскаде в 2 раза, складываются два равных уровня шумовой мощности, и результирующий уровень шума будет на 3 дБ выше уровня шума каждого из соединяемых в каскад усилителей (или блоков).

Приведем пример использования этой диаграммы. Предположим, что каскад состоит из 16 усилителей, работающих при одном и том же уровне входных сигналов, и отношение C/N каждого отдельного усилителя равно 58 дБ. Найдем на вертикальной шкале диаграммы, изображенной на рис. 5.3 число, соответствующее числу 16. Это значение составляет 12 дБ. Вычитая его из значения C/N для одного усилителя, определяем комбинированное значение C/N для 16

блоков: $58 \text{ дБ} - 12 \text{ дБ} = 46 \text{ дБ}$. Уровни мощности шума всех усилителей в этом примере были одинаковы.

Заметим, что приведенная на рисунке диаграмма дает точные результаты только в случае кратного двум числа одинаковых комбинируемых в каскад блоков. Для точного комбинирования любого количества одинаковых блоков используется общая логарифмическая формула:

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg n,$$

где C/N – отношение одного усилителя, C/N_{Σ} – отношение каскада усилителей, n – число усилителей в каскаде. Общее C/N_{Σ} будет меньше C/N каждого усилителя на величину $10 \lg n$, что совпадает с результатами, полученными прежде с помощью диаграммы. Например, вычислим отношение каскада из 15 усилителей, имеющих равные отношения 57 дБ:

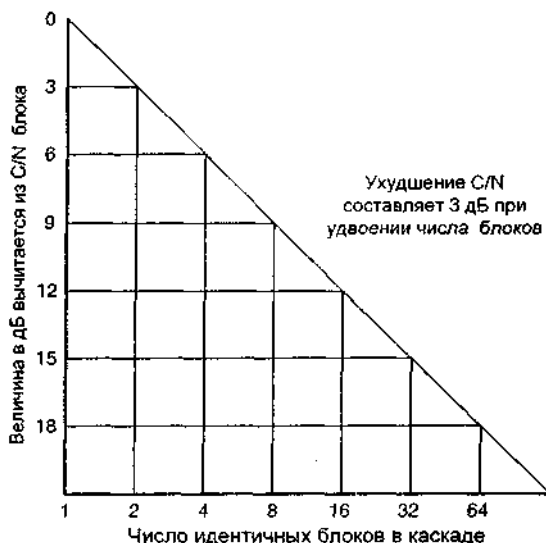


Рис. 5.3. Комбинирование равных C/N

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \log n = 57 - 10 \log 15 = 45,2 \text{ дБ}.$$

Существует модификация данного метода, позволяющая комбинировать неравные отношения. Это необходимо при сборке системы разных блоков (усилителей), создающих неодинаковые уровни мощности шума. Это возможно, если блоки (усилители) имеют разные коэффициенты шума F или если они работают при разных уровнях входных сигналов или если блоки состоят из разного количества блоков (усилителей). Примером последнего является добавление одного каскада одинаковых усилителей к другому каскаду из таких же усилителей (например, из 5 и 12), работающих при одинаковых уровнях, что требуется очень часто.

Другим примером является комбинирование C/N каскада усилителей с C/N , выражающим качество сигнала на выходе головной станции, поскольку крайне маловероятно, чтобы эти отношения были абсолютно одинаковыми. В обоих

случаях складываемые мощности шума не будут равны, поэтому пользуются представленной на рис. 5.4 диаграммой. С ее помощью можно комбинировать два разных значения C/N .

Предположим теперь, что добавляем 16 одинаковых усилителей к такому же каскаду из 16 усилителей, как в первом примере, и все эти усилители работают при равных уровнях входных сигналов. Так как отношение C/N добавляемого каскада равно отношению C/N первоначального каскада из 16 усилителей, необходимо найти комбинированное значение двух одинаковых отношений C/N с помощью рис. 5.3.

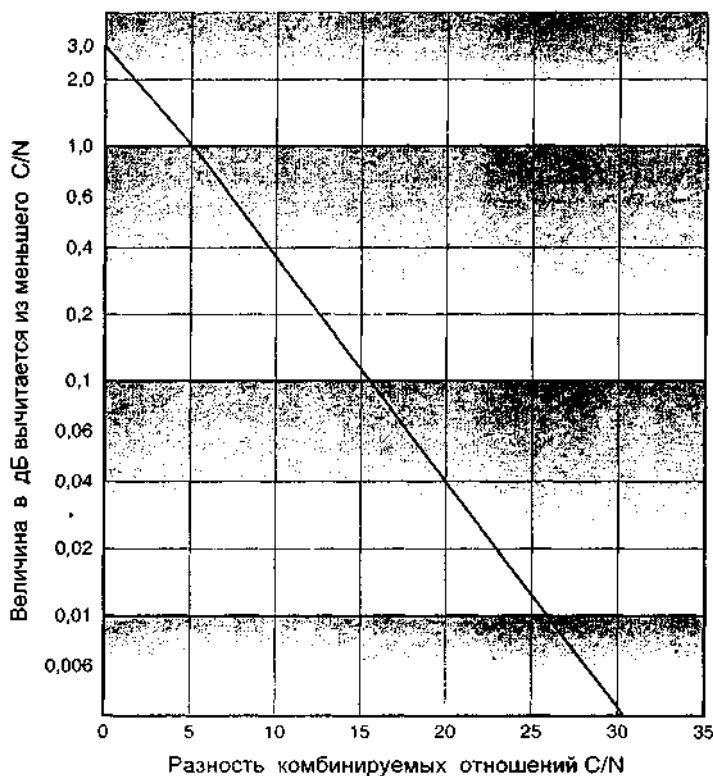


Рис. 5.4. Комбинирование неравных C/N

Как уже отмечалось, каждое увеличение числа усилителей в каскаде в два раза порождает уменьшение результирующего значения C/N на 3 дБ. Добавляя 16 усилителей к 16 имеющимся, удваиваем их количество, поэтому результирующее значение C/N всего каскада станет на 3 дБ меньше (хуже), чем данное для первоначального каскада из 16 усилителей значение 46 дБ, т.е. комбинированное отношение C/N каскада из 32 усилителей и составит 43 дБ.

Для решения этой задачи можно воспользоваться также и диаграммой на рис. 5.4, как более общей. При равных значениях C/N комбинируемых каскадов разность между ними равна нулю. По диаграмме определим, что значению 0 дБ на горизонтальной шкале соответствует значение 3 дБ. Вычитая это число из наименьшего значения C/N комбинируемых каскадов (т.е. из любого, поскольку

они равны), получаем, что общее отношение C/N для каскада из 32 одинаковых усилителей равно 43 дБ. Это совпадает с полученным ранее результатом.

Используемые здесь диаграммы называются логарифмическими, поскольку в них используется нелинейный (логарифмический) масштаб шкалы – в первой диаграмме это шкала количества усилителей, а во второй диаграмме это шкала приращения отношения C/N .

Относительное неудобство этой диаграммы состоит в том, что она применима только для комбинирования двух значений. При выполнении реальных проектов часто требуется вычисление комбинированного C/N для системы из нескольких неодинаковых блоков, которые могут иметь различные коэффициенты шума и работать при разных входных уровнях сигналов. Это возможно, например, при необходимости расчета шума каскада, составленного из различных усилителей. Чаще встречается ситуация, когда нужно комбинировать такие принципиально различные части системы как головная станция, магистральный каскад и домовая сеть. В таких случаях методика расчета состоит в том, чтобы сперва отдельно вычислить с помощью диаграммы на рис. 5.3 комбинированные отношения C/N для тех частей системы, которые составлены из блоков с одинаковыми C/N (если таковые части есть). Полученные результаты поочередно комбинируются с C/N других частей с помощью диаграммы на рис. 5.4 в следующем порядке. Сначала комбинируются любые два значения C/N , затем их общий результат комбинируется с любым из оставшихся, затем новый общий результат комбинируется с любым из оставшихся и так далее, до последнего оставшегося значения.

Аналитический метод основан на использовании формулы Фриза, которая позволяет вычислить общий коэффициент шума любого количества любых каскадно включенных активных устройств. Под активными устройствами понимаются антенные усилители, усилители головной станции, магистральные и домовые усилители, оптические приемники. При каскадировании n активных устройств общий коэффициент шума каскада можно найти следующим образом:

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{K_1 \dots K_{n-1}},$$

где F_i – коэффициент шума i -го усилителя, K_i – коэффициент усиления i -го усилителя.

Эта формула показывает, что наибольший вклад в общий коэффициент шума каскада вносит первый усилитель при условии, что его коэффициент усиления с учетом потерь между ним и последующим усилителем значительно больше единицы, что всегда выполняется в магистральных каскадах кабельных сетей. При условии полной компенсации потерь на магистральном участке, когда коэффициент усиления каждого усилителя равен потерям на этом участке и условии использования идентичных усилителей суммарный коэффициент шума цепочки из n усилителей можно выразить более простым способом:

$$F_{\Sigma} = 1 + n(F - 1).$$

Чтобы выразить полученный с помощью любой из этих формул F_{Σ} в децибелах нужно взять от рассчитанного значения $10 \lg$.

Физический смысл формулы Фриза состоит в том, что в любом каскаде активных устройств происходит накопление мощности шума. Это относится и к магистральному каскаду усилителей и к комбинации магистральных усилителей

с домовыми усилителями и к комбинации головной станции с магистралью. С удалением от головной станции наблюдается снижение отношения C/N по мере увеличения числа устройств в каскаде.

Существует формула и определения для общего отношения C/N системы (головная станция, магистральный каскад, стояк домовой сети и их комбинации). Эта формула широко используется для точных расчетов выходного C/N каскада любых активных устройств, работающих при разных входных уровнях и имеющих различные собственные C/N . Именно здесь, в расчете выходного C/N каскада, используется величина приведенного динамического диапазона, активного устройства, которая связана с явлением накопления шумов. Для каждого широкополосного усилителя, предназначенного для работы в современных кабельных сетях с полосой частот до 1000 МГц, в спецификации должно быть указано значение приведенного динамического диапазона. Количество шумов, накопленное от всех n активных устройств, через которые проходит сигнал в системе, характеризуется величиной C/N_{Σ} , которая находится через отношения C/N_i каждого из устройств:

$$C/N_{\Sigma} = -10 \lg \left(10^{-\frac{C/N_1}{10}} + 10^{-\frac{C/N_2}{10}} + \dots + 10^{-\frac{C/N_n}{10}} \right).$$

Частным случаем этой формулы является приведенное выше выражение для получения общего C/N каскада, составленного из n устройств с равными C/N .

Последняя формула является основой для расчета магистральных каскадов и целых распределительных сетей, включающих оптический узел, магистраль и домовые сети. При этом логарифмически суммируются известные значения приведенного динамического диапазона устройств, являющиеся их выходными отношениями сигнала к шуму $C/N_{\text{вых } i}$.

Приведем несколько примеров расчета отношений C/N . Как было показано, отношение C/N является функцией как от коэффициента F усилителя, так и от уровня входного сигнала. Как только выбор усилителя сделан, значение F уже не может быть изменено, но остается возможность управлять отношением C/N , изменяя рабочее значение уровня входного сигнала усилителя.

В ранее рассматриваемом нами примере использовался усилитель с $F = 9$ дБ и входным уровнем $+5$ дБ·мВ, что обеспечивало отношение C/N , равное 55 дБ. Если увеличить входной уровень на 1 дБ до $+6$ дБ·мВ, а F останется неизменным и равным 9 дБ, то усилитель будет обеспечивать входное значение C/N 56 дБ. Это можно проверить с помощью расчетов:

$$C/N_{\text{вх}1} = S_{\text{вх}1} + 58 - F = 5 \text{ дБ·мВ} + 58 \text{ дБ·мВ} - 9 \text{ дБ·мВ} = 54 \text{ дБ},$$

$$C/N_{\text{вх}2} = S_{\text{вх}2} + 58 - F = 6 \text{ дБ·мВ} + 58 \text{ дБ·мВ} - 9 \text{ дБ·мВ} = 55 \text{ дБ}.$$

Эти расчеты сделаны для одиночного усилителя и показывают, что для улучшения (увеличения) отношения C/N на 1 дБ необходимо увеличить входной уровень также на 1 дБ.

Определим общее входное C/N_{Σ} каскада усилителей, имеющих одинаковые значения F и работающих при одинаковых уровнях входных сигналов, а, следовательно, создающих равные входные C/N . Вычислим значения C/N каскада из 25 усилителей для обоих входных уровней, которые были рассчитаны для одиночного усилителя.

$$C/N_{\Sigma 1} = 55 \text{ дБ} - 10 \lg 25 = 41 \text{ дБ},$$

$$C/N_{\Sigma 2} = 56 \text{ дБ} - 10 \lg 25 = 42 \text{ дБ}.$$

Результаты расчетов ясно показывают, что увеличение входных уровней на всех усилителях на 1 дБ приводит к улучшению отношения C/N всей системы на 1 дБ. С другой стороны, уменьшение входных уровней на всех усилителях на 1 дБ приводит к ухудшению или снижению отношения C/N системы также на 1 дБ. Руководствуясь этим правилом при проектировании кабельных систем, можно быть уверенным в том, что определенное изменение входных уровней сигналов в системе окажет предсказуемый желаемый эффект на отношение C/N в оконечных точках системы.

5.5. Отношение C/N и выравнивание амплитуд

Шум, создаваемый входными ступенями усилителей, по своей природе является "белым" или равномерным, т.е. присутствует во всем интересующем нас спектре частот с одинаковыми амплитудами. Поэтому отношение C/N отдельного усилителя или системы из многих усилителей не зависит от ширины полосы частот (или числа ТВ каналов и других служб в данной системе). Но это справедливо, только если все несущие имеют равные амплитуды на входах усилителей. Это требование не является только теоретическим, поскольку коаксиальный кабель характеризуется различными потерями передачи на разных частотах, в результате чего уровни несущих на разных частотах полосы становятся различными. Поэтому чтобы обеспечить равные C/N для всех передаваемых несущих, следует выравнивать уровни передачи несущих во всей полосе обратно пропорционально частотной характеристике потерь в кабеле с помощью эквалайзеров, установленных на входах усилителей.

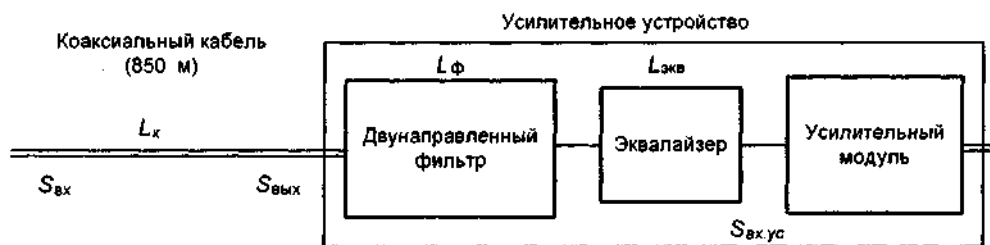


Рис. 5.5. Использование эквалайзера

На рис. 5.5 изображен коаксиальный кабельный участок длиной 850 м, на выходе которого установлено усилительное устройство. В табл. 5.1 даны расчеты уровней и C/N для трех случаев – без выравнивания в усилителе А, с выравниванием в усилителе В, с выравниванием в усилителе и наклоном на входе усилителя С. Во всех трех примерах кабель создает существенно более высокие потери передачи на частоте 223,25 МГц (канал R12), чем на частоте 59,25 МГц (канал R2). В примере А изображены уровни и потери передачи при подаче в кабель обеих несущих с одной амплитудой +40 дБ-мВ. В примере А выравнивание перед усилительным модулем не обеспечивается и, поэтому, как и следовало ожидать, разность отношений C/N двух сигналов в этом случае

5.4. Расчет шума каскада усилителей

наибольшая, что и показано в последнем столбце данных. Если эта система будет расширена при условии, что все усилители системы находятся в одинаковых условиях, то в конечном итоге сигнал достигнет такой точки в системе, где 12-й канал будет уже неразличим на фоне шума, хотя 2-й канал все еще будет иметь удовлетворительное качество.

В примере В входные уровни обоих сигналов также равны +40 дБ·мВ, а уровни на выходе кабеля различаются на 16 дБ. Это различие компенсируется эквалайзером, который вносит различные потери для этих двух сигналов. В результате уровни обоих сигналов на входе усилительного модуля равны и, как и ожидалось, отношения C/N для обоих сигналов также равны.

Таблица 5.1

Уровни передачи и отношение C/N

Пример/ канал	Кабель			Усилитель			C/N, дБ	
	$S_{вх}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{вых}$, дБ·мВ	L_f , дБ	$L_{экв}$, дБ	$S_{вх, ус}$, дБ·мВ		
А	2	+40	15	+25	0,5	0	+24,5	75,5
	12	+40	31	+9	0,5	0	+8,5	58,5
В	2	+40	15	+25	0,5	16,5	+8	58,0
	12	+40	31	+9	0,5	0,5	+8	58,0
С	2	+32	15	+17	0,5	8,5	+8	58,0
	12	+40	31	+9	0,5	0,5	+8	58,0

К сожалению, методика выравнивания на входе усилителя (т.е. на выходе кабельного участка) имеет один практический недостаток. На входе участка коаксиального кабеля (слева на рисунке) уровни обоих сигналов равны и обеспечить абонентское ответвление в этой точке не сложно. Но так как уровни несущих на входе усилительного устройства различаются существенно (на 16 дБ, $25 - 9 = 16$), то в абонентском ответвлении, включенном перед усилителем, будет создаваться значительный наклон уровней.

С этой точки зрения считается, что правильнее и удобнее регулировать наклон спектра передачи на выходе усилителя (т.е. на входе кабельного участка), чтобы на входе кабеля получить такое соотношение уровней, как показано в примере С на рис. 5.5. Потери в кабеле, конечно, останутся теми же, но в любой точке кабеля разность уровней двух несущих не превышает 8 дБ. Как в примере В, так и в примере С обеспечивается одно и то же значение C/N для обеих несущих, но в примере С изменение уровня сигнала в пределах кабельного участка ограничивается. Метод, с помощью которого можно создать нужный наклон уровней на входе кабельного участка, называется предварительной коррекцией наклона.

5.6. Влияние шума на качество передачи

Целью экономически эффективной реализации системы передачи является обеспечение приемлемого качества передачи во всех точках системы. Наихудшее качество передачи по показателю C/N будет получено в тех точках систе-

мы, где сигнал прошел через наибольшее число усилителей. Ухудшение качества передачи может ощущаться зрителем визуально, в воспроизводимом телевизионном изображении.

Большое значение в борьбе с шумами имеет помехоустойчивость используемого метода модуляции сигнала. В аналоговых системах борьба с шумом передачи представляет более трудную задачу, чем в цифровых системах, поскольку амплитудная модуляция видеосигнала, применяемая в аналоговом телевидении, характеризуется наименьшей помехоустойчивостью по сравнению со всеми другими методами. Однако, решение об ее использовании, принятое на заре развития систем ТВ вещания, было вынужденной мерой, поскольку, спектр, занимаемый амплитудно-модулированным сигналом гораздо уже, чем спектр частотно-модулированного сигнала. Системы цифрового телевидения, в которых используются методы модуляции QPSK и QAM, имеют более высокую помехоустойчивость, поэтому многие искажения и помехи, ухудшающие качество передачи аналогового сигнала, просто не влияют на цифровой сигнал. Некоторые искажения свойственные аналоговому телевидению, проявляются и в цифровых системах, но цифровому телевидению присущи и свои, специфические, искажения.

Следует заметить, что в цифровых и аналоговых системах передачи используются разные количественные показатели уровня шума. Величина шума в системах аналогового телевидения оценивается с помощью уже известного показателя сигнал-шум (C/N). Величина шума в системах цифрового телевидения оценивается в основном вероятностью ошибочного приема бита (Bit Error Rate, BER), которая определяется отношением переданных с ошибками битов к общему числу переданных битов. Например, если отношение BER равно 10^{-9} , это означает, что в одном из миллиарда переданных битов сохранилась ошибка, и этот бит был детектирован неправильно. Граничный (максимально допустимый) показатель качества цифровой передачи BER относится к уровню сигнала на входе приемника, при котором приемник не синхронизируется, т.е. не фиксирует синхроимпульсы в поступающем сигнале и, следовательно, не восстанавливает информацию из этого сигнала. Иногда относительно цифровой передачи говорят, что при таком условии имеет место полный отказ системы. Особенность цифровой системы передачи состоит в том, что обычно она перед резким ухудшением показателя BER и отказом системы происходит медленное его ухудшение, которое может считаться допустимым. В сетях, ориентированных на пакетную передачу, где биты группируются в пакеты кроме этого учитывается еще и вероятность ошибочного приема пакета (Package Error Rate, PER).

Поскольку цифровые системы передачи строятся на основе оптики, то можно говорить о показателе BER как показателе шума оптических систем передачи. Оптическое волокно невосприимчиво к влиянию многих шумов, которым подвержены металлические проводники вследствие электромагнитной индукции. Широкополосный белый шум, однако, может быть внесен в оптический сигнал приемниками и передатчиками. Поскольку оптический приемник обычно работает с входным сигналом очень низкого уровня, то он в первую очередь является источником шума в оптической системе передачи. Здесь прослеживается аналогия с входными ступенями усилителей в коаксиальной системе передачи. Как правило, оптические приемники характеризуются входным уровнем оптического сигнала по отношению к S/N выходного электрического сигнала в

случае передачи аналоговых сигналов и отношением BER в случае цифровой передачи. Например, производитель может определить в спецификации оптического приемника, что его отношение BER составляет 10^{-9} при минимальном входном уровне оптического сигнала $-40,5$ дБ-м. Это значит, что если входной уровень будет ниже $-40,5$ дБ-м, то качество выходного электрического сигнала приемника ухудшится и будет характеризоваться показателем, который превышает 10^{-9} . С другой стороны, подавая на вход приемника оптический сигнал слишком высокого уровня, можно его перегрузить, что приведет также к ухудшению качества передачи.

Заметим, что показатель S/N характеризует в первую очередь белый шум, вносимый терминальным оборудованием, а показатель BER зависит не только от вносимого шума, но также учитывает искажение импульса вследствие дисперсии. В оптических системах причин искажения двоичного импульса (бита) может быть множество. В частности искажение может быть обусловлено модовой дисперсией или хроматической дисперсией, включающей материальную и волноводную дисперсию. Показатель BER, принятый за основной показатель качества цифровой передачи, связан с битовой скоростью и с требуемой шириной полосы передачи. Битовая скорость передачи данных – это количество битов, переданных за данный период времени. Более узкополосные системы оцениваются большим временем нарастания импульса, следовательно, меньшим значением BER.

Хотя среди разработчиков систем КТВ существует много мнений относительно допустимого уровня шума в аналоговом ТВ сигнале, существуют общепринятые стандарты, основанные на проведении многочисленных тестов. Зрительно появление шума в ТВ изображении воспринимается, как “снег” и если для одного зрителя при некотором уровне шума снег не экране только становится заметным, то для другого он может восприниматься как “сильный снег”. Иначе говоря, некоторый уровень шума, незаметный для одного зрителя, может быть заметным и нежелательным для другого, более восприимчивого, зрителя. Поэтому для определения единого порога зрительного восприятия шума применим только один метод, при котором большое количество зрителей наблюдают изображение с одним и тем же уровнем шума, а затем результаты усредняются каким-либо способом. Для экспертной оценки качества изображения по величине присутствующего в нем шума Международный Консультативный Комитет Радио (International Radio Consultative Committee, CCIR) разработал методику, которая была описана в гл. 3.

Качество изображения определяется двумя показателями – фактором качества Q и фактором ухудшения I в сравнении с идеальным изображением без шума. Паре значений (Q, I) соответствует некоторая оценка по пятибалльной шкале, как показано в табл. 5.2. из таблицы следует, что идеальному качеству изображения соответствует пара $Q = 5, I = 0$. Наихудшему изображению, совершенно непригодному для просмотра соответствует $Q = 1$ и очень большое значение I . Фактор качества и фактор ухудшения связаны следующим образом:

$$Q = \frac{I+5}{I+1}, \quad I = \frac{5-Q}{Q-1}.$$

По результатам множества тестов и измерений было установлено соотношение между субъективной оценкой качества изображения и значением S/N,

что и отражено в табл. 5.2. Таким образом, зрительный шумовой порог, при котором изображение практически невозможно воспринимать, равен 30 дБ.

Таблица 5.2

Диапазоны значений S/N

Оценка, балл	Q	I	S/N, дБ
5 (отлично)	5	0	>48
	4.6	0.125	45
	4.2	0.25	43
4 (хорошо)	4	0.333	42
	3.7	0.5	41
3 (посредственно)	3	1	38
2 (плохо)	2	3	34
1 (очень плохо)	1	-	<30

Важно отметить, что если уровень шума ниже порога зрительного восприятия (S/N выше), то увеличение отношения сигнал/шум не приведет к улучшению в восприятии изображения зрителем. Т.е., если шум на экране не виден, снижение уровня шума по отношению к уровню сигнала не может восприниматься как улучшение. Но в действительности шум накапливается в системе, поэтому ограничение дальнейшего возрастания уровня шума, является необходимостью. Широко принятое стандартное допустимое значение накопленного шума в коаксиальной кабельной системе передачи C/N равно 43 дБ при значении сигнал-шум S/N около 39 дБ для полосы 6 МГц. Разработчик системы в праве накладывать более жесткие требования на значение C/N, но это экономически необосновано.

Допустимые значения показателя BER цифровых систем определяются исходя из того условия, что потери в потоке видео, звука или данных должны быть не заметны для получателя. Эта оценка различается для разных служб. Например, для голосового трафика, передаваемого по цифровым каналам 3 кГц, показатель BER, при котором в среднем каждые 15 с слышится едва различимый щелок (такое качество считается приемлемым), составляет 10^{-6} . Это крайнее значение BER, при котором линия связи еще остается информативной, но при несколько меньшем значении качество передачи резко падает. Для других служб допустимое значение BER может отличаться на порядки. Самые высокие требования к показателю BER предъявляют различные службы передачи данных, для которых цена потери пакета или отдельного бита гораздо выше, чем для звука. Телевидение требует канала с примерно таким же значением BER, как и передача данных. Установлено, что при вероятности BER = 10^{-6} линия, предназначенная для голосовых служб, вполне применима для передачи данных, что используется при доступе в Интернет с помощью телефонного модема. Таким образом, передача качественного телевизионного сигнала иногда является более трудной задачей, чем даже передача данных. Это объясняется тем, что при передаче данных могут применяться специальные протоколы, позволяющие выполнять повторную передачу испорченных бит и не требующие строгого соблюдения временной за-

всисмости между источником и приемником, тогда как телевизионное вещание или передача видеопотока должна осуществляться в режиме реального времени с почти постоянной задержкой между источником и приемником.

Согласно результатам исследований европейского центра в области телекоммуникаций (Research on Advanced Communication in Europe, RACE) для ТВ вещания величина BER должна составлять менее 10^{-6} . Больше или равное 10^{-6} значение BER приведет к потере отдельных элементов изображения или его разложению. Для устойчивой передачи телевизионного сигнала BER должна составлять не более 10^{-8} . Стандарт цифрового телевизионного вещания по кабельным сетям DVB-C предусматривает, что величина BER должна находиться в пределах от 10^{-6} до 10^{-11} , причем при значении 10^{-11} качество характеризуется как практически идеальное и приемлемое для передачи сигналов телевидения высокой четкости.

Можно показать, что показатель BER эквивалентен по физическому смыслу отношению C/N для аналоговой передачи. Можно соотнести показатель BER и отношение C/N, измеренные в одной и той же полосе передачи, например, в полосе ТВ канала или в полосе канала звукового сопровождения. Постепенно увеличивая уровень аналоговой несущей, изменение которого вызывает изменение отношений C/N отдельных каналов, при постоянной полосе частот можно построить диаграмму ухудшения C/N от уровня аналогового сигнала, а также диаграмму изменения BER цифровых каналов от уровня аналогового сигнала.

На рис. 5.6 показано, что соотношение этих двух величин выражается линейной зависимостью для разных типов модуляции QAM (типы модуляции QAM были описаны в гл. 3). Чтобы оценить потенциальную помехоустойчивость цифровой передачи с использованием модуляции QAM и QPSK сделаем несколько предположений. Поскольку при модуляции QAM символы имеют разные амплитуды, предположим для упрощения модели, что ошибка приема символа происходит если мощность шума превышает половину разницы между передаваемым символом и ближайшим к нему соседним символом. Далее допустим, что передача различных символов равновероятна, и что информационная нагрузка каждого символа отличается от соседнего символа только на один бит, чтобы возможная ошибка была минимальна. Использование помехоустойчивого кодирования при этом не учитывается. Тогда вероятность ошибочного приема отдельного символа будет определяться следующим соотношением:

$$P_{\text{ош}} = Q\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right), \quad h^2 = \frac{E_s}{N_0},$$

где E_s – эквивалентная энергия символа, N_0 – спектральная плотность мощности помехи, $Q(x)$ – гауссовская функция распределения шума в канале.

Значение BER будет определяться делением вероятности $P_{\text{ош}}$ на 8 для модуляции QAM-256, на 6 для QAM-64, на 4 для QAM-16 и на 2 для QPSK. Зависимости BER от отношения сигнал/шум для модуляций QAM-64 и QAM-256 приведены на рис. 5.6. Как уже было сказано, цифровая передача возможна при более высоком уровне шума, чем аналоговая передача. Поэтому, например, при модуляции QAM-64 приемлемое для цифровой передачи качество может быть обеспечено таким значением BER, которое соответствует отноше-

нию C/N около 30 дБ, что было бы совершенно неприемлемо для аналоговой передачи.

Связь показателей BER и C/N имеет чисто практическое значение для оценки качества передачи (цифровой и аналоговой). К сведению, ранние цифровые системы, в которых использовалась цифровая модуляция несущей 70 МГц с мультиплексированием четырех цифровых сигналов DS-1 (1,544 Мбит/с) в единый импульсный поток со скоростью 6,312 Мбит/с, позволяли передавать 96 голосовых каналов. Измерив BER одного из этих каналов и уровень передачи несущей 70 МГц, можно оценить качество передачи и требуемое количество усилителей в каскаде. В действующей коаксиальной кабельной системе количество усилителей в каскаде составляло 18.

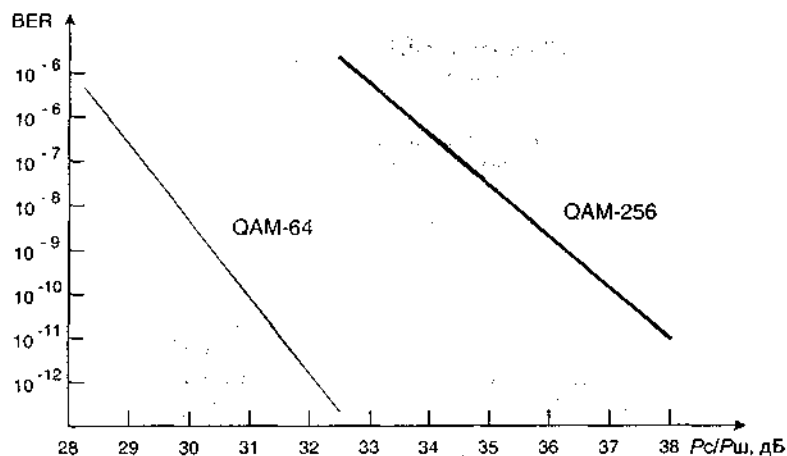


Рис. 5.6. Зависимость BER от отношения C/N

На качество передаваемого изображения оказывают влияние и помехозащитные свойства среды передачи. Отношение сигнал/шум можно улучшить применением более качественных коаксиальных кабелей с тройным экранированием, пассивных делителей и ответвителей с максимальным экранированием (не менее 120 дБ) либо применением технологии гибридных кабельных сетей HFC. Наилучшим решением здесь оказывается использование на большинстве участков сети волоконно-оптического кабеля, поскольку даже хорошо экранированный коаксиальный кабель со временем испытывает ухудшение своих характеристик и становится подвержен действию электромагнитного излучения и чем больше длина кабеля, тем выше уровень накопленных в нем помех. Волоконно-оптический кабель, напротив, абсолютно не чувствителен к постороннему электромагнитному излучению.

Резюме

Шум в коаксиальной кабельной системе передачи имеет тепловое происхождение, т.е. возникает в результате тепловых флуктуаций электронов. Тепловой шум устанавливает нижнюю границу напряжения шума любого устройства или источника сигнала, имеющего резистивные элементы. Тепловой шум имеет не-

5.6. Влияние шума на качество передачи

прерывный спектр – его амплитуда примерно постоянна во всей полосе частот. Главным количественным показателем шума в системе передачи является отношение “несущая-шум” C/N . Основными источниками шума в системе являются активные устройства. Факторами, участвующими в расчетах внутреннего шума прибора, являются ширина полосы этого прибора, его шумовая температура и сопротивление источника сигнала. Выбором коэффициента шума F , коэффициента усиления K усилителя и изменением выходных уровней в системе можно создавать любое требуемое отношение C/N на выходе усилителя.

При последовательном включении (каскадировании) нескольких активных устройств шум накапливается. Накопленный в каскаде шум можно оценить с помощью логарифмических диаграмм методом комбинирования или с помощью точных расчетных формул. Шум каскада усилителей складывается из шумов, вносимых каждым усилителем в каскаде. Соответствующий выбор выходного уровня предыдущего усилителя, кабеля с определенными потерями и расстояния между усилителями также позволяет регулировать отношение C/N каскада. Распределительная кабельная сеть, конечно, не единственный источник шума во всей системе КТВ. В системе КТВ существует несколько точек, предназначенных для контроля ее рабочих характеристик. Контрольные точки расположены как на входе распределительной сети (выходе головной станции), так и на ее выходе (абонентские точки). Поэтому для распределительной кабельной сети создается своя спецификация, которая должна быть совместима со спецификациями других источников шума в системе.

Глава 6

ИСКАЖЕНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Современные системы КТВ должны передавать более 50 различных сигналов. Количество паразитных сигналов в таких системах измеряется сотнями. В реальной кабельной системе с большим числом каналов и усилителей присутствуют все виды искажений в той или иной степени. Нужно уметь оценивать их величину, понимать, как эти искажения накапливаются в системе, и как можно ограничить их значение, чтобы получить требуемый уровень искажений на выходе абонентской розетки.

6.1. Искажение как свойство системы

Для понимания технологии кабельных систем передачи необходимо понимание природы искажений, происходящих в любой коаксиальной кабельной сети. Как уже отмечалось в предыдущих главах, искажения сигнала являются одной из причин ухудшения качества передачи (другой причиной является влияние шума). Понимать механизмы возникновения и накопления искажений в кабельной системе необходимо, чтобы знать, какие ограничения они накладывают на реализацию любого конкретного проекта системы. Рассмотрим эти механизмы и те виды искажений, которые они порождают.

Искажения в общем смысле можно определить как изменения в форме сигнала, производимые при прохождении сигнала через какую-либо цепь или устройство, в результате чего форма выходного сигнала отличается от формы входного сигнала. Как и в случае с шумами, механизм возникновения искажений в кабельной сети связан с естественным затуханием сигнала при его передаче по коаксиальному кабелю. Любое устройство обладает некоторой нелинейностью в отношении между его входными и выходными сигналами ввиду нелинейности и неравномерности его АЧХ, о которой говорилось в главе 4. Кабель обладает нелинейной АЧХ, поэтому ее компенсируют с помощью выравнивателей, АЧХ которых должна быть также нелинейной. Затухание сигнала компенсируется включением в кабель усилителей. Практически влияние этих особенностей АЧХ выражается в том, что при прохождении сигнала через систему форма выходного сигнала будет отличаться от желаемой. Это означает, что в выходном сигнале либо появятся новые частотные составляющие, представляющие собой помехи полезному сигналу, либо какой-либо параметр полезного сигнала отклонится от нормативного значения. В том и другом случае говорят, что оборудование системы передачи вносит в сигнал искажения. Чем большей мощности сигнал проходит через систему, тем сильнее, как правило, будет сказываться нелинейность, и, следовательно, выше будет уровень вносимых искажений.

Существует несколько видов искажений, и здесь рассмотрим каждый из них. Все существующие искажения можно разделить на линейные и нелинейные.

Суть линейных искажений состоит в том, что величины затухания и величины задержки сигналов разных частот различаются из-за неравномерности характеристики коэффициента передачи системы в пределах всей полосы частот. Линейное искажение сигнала не связано с появлением в нем новых частотных составляющих, а только вызывает отклонение какого-либо параметра этого сигнала. Результатами линейных искажений являются такие нарушения в телевизионном изображении как изменение динамического диапазона сигнала яркости, несоответствие сигналов яркости и цветности, появление двойных контуров. Источниками линейных искажений могут быть различные приборы кабельной системы и, в том числе, коаксиальный кабель.

Нелинейные искажения, напротив, приводят к появлению новых частотных составляющих в полосе системы передачи и возникают в результате взаимодействия несущих нескольких полезных сигналов друг с другом или с помехой. Важнейшим для нас видом нелинейных искажений, с точки зрения создания кабельной системы с большой областью обслуживания, являются интермодуляционные искажения, так как именно они накладывают серьезные ограничения на протяженность системы. Результатом интермодуляционных искажений будет появление множества ложных сигналов вследствие наложения или переноса информации от одной несущей к другой. При некотором уровне амплитуды искажения становятся заметными визуально как помехи в телевизионном изображении. Конкретный визуальный уровень искажения может быть различным для различных видов искажений, поэтому разработчик системы обязан проанализировать суммарный уровень искажений для наихудшего случая, т.е., определить при каком уровне искажения начнут становиться заметными, и убедиться, что те неизбежные искажения, которые накопятся в результате, будут ниже уровня зрительного восприятия.

Источниками нелинейных искажений является всевозможное активное оборудование. В коаксиальных системах передачи это различные усилители – антенные, магистральные, домовые. В оптических системах передачи это оптические передатчики и оптические приемники. Нелинейные искажения накапливаются в системе любой, сколько-нибудь значительной, протяженности. Явление накопления искажений сходно явлению накопления шумов и описывается теми же законами. Чем большее количество усилителей проходит сигнал на своем пути до абонентской точки, тем более сильное искажение он испытывает. В частности, по этой причине требования к магистральным усилителям по уровню нелинейных искажений должны быть выше, чем к домовым. В гибридной коаксиально-оптической системе передачи основная доля нелинейных искажений появляется в коаксиальной части, поэтому далее рассмотрим механизм возникновения искажений в широкополосных усилителях.

Поскольку выходная ступень усилителя призвана создавать наибольшее усиление и, соответственно, через нее проходит сигнал самого высокого уровня, то вопрос появления интермодуляционных искажений в первую очередь касается этой части усилителя и не связан с отношением сигнал/шум, которое является определяющим фактором для входной ступени усилителя. Шум, вносимый усилителем, как показано в предыдущей главе, определяется для любого усилителя только его собственными качественными параметрами, важнейший из которых называется коэффициентом шума. Интермодуляция представляет собой более сложное явление и зависит не только от собственных параметров усилителя. При определении величины интермодуляционных искаже-

ний следует учитывать не только действующий выходной уровень сигнала, но и количество сигналов (ТВ каналов), проходящих через него. Если через усилитель проходит сразу несколько сигналов, то общая мощность, проходящая через выходную ступень, увеличивается и, следовательно, увеличиваются искажения, но искажение определяется не только этим фактором. Искажение возникает также и вследствие взаимодействия различных составляющих каждого сигнала между собой (например, несущих изображения и звука в ТВ сигнале), в результате которого одни сигналы модулируются другими. В общем случае, чем больше сигналов проходит через усилитель, и, чем больше усилителей установлено в системе, тем выше будет искажение сигнала в результате интермодуляции.

Необходимо понимать, что линейные и нелинейные искажения в реальной системе передачи появляются одновременно и всегда сопутствуют друг другу. Разделение искажений на линейные и нелинейные это только способ описания одного и того же явления (изменения сигнала) с разных сторон, позволяющий выделить факторы, отвечающие за появление новых гармоник, и факторы, отвечающие только за изменение параметров сигнала. Формально будет правильным сказать, что нелинейность АЧХ является причиной и линейных и нелинейных искажений, а неравномерность АЧХ является причиной только линейных искажений. Общей причиной тех и других искажений является нелинейность АЧХ, поскольку невозможна ситуация, при которой АЧХ была бы равномерной, но нелинейной, а обратная ситуация возможна. Однако, АЧХ реальной системы передачи всегда нелинейна, поэтому искажения обоих типов присутствуют в системе постоянно.

Искажения, линейные и нелинейные, можно также разделить на каналные (узкополосные) и диапазонные (широкополосные). Из самих названий ясно, что к каналным искажениям относятся те искажения, которые появляются в результате взаимодействия сигналов (или, вернее, отдельных составляющих сигнала) в полосе одного ТВ канала. Диапазонными искажениями называются искажения, образующиеся в результате взаимодействия сигналов нескольких ТВ каналов. Канальные искажения присущи активному каналному оборудованию (антенным усилителям и усилителям головных станций), а диапазонные искажения присущи активному широкополосному оборудованию (линейным магистральным и домовым усилителям).

6.2. Линейные искажения

К показателям линейных искажений, согласно стандарту EN-50083, относятся неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), коэффициент возвратных потерь, неравномерность группового времени задержки (ГВЗ), дифференциальное усиление (Diff Gain) и дифференциальная фаза (Diff Phase), неравномерность характеристики яркость-цветность.

Коэффициент возвратных потерь (RL) характеризует степень согласованности отдельных устройств системы передачи по входным и выходным сопротивлениям. Требование согласования является обязательным в кабельных сетях, а в случае его невыполнения в системе появляются отражения, которые будут подробно рассмотрены в следующей главе. Т.е. эта величина показывает, насколько высок уровень отраженного сигнала к системе. Стандартная величина затухания на несогласованности со стороны входа, связанная с коэффициентом

том возвратных потерь, должна составлять не менее 20 дБ. В отечественной технической литературе для оценки доли отраженной энергии сигнала используется коэффициент стоячей волны КСВ (в зарубежной литературе SWR), аналогичный по смыслу коэффициенту возвратных потерь (подробнее об этом см. в гл. 8).

Неравномерность группового времени задержки в полосе телевизионного канала должна быть минимальной. Стандартная величина расхождения во времени задержки для головной станции с устройствами формирования сигналов ТВ вещания, например, должна составлять не более 60 нс (измеряется от входа модулятора до выхода телевизионного измерительного демодулятора). Для измерений этой величины используется импульсный метод с периодом 20Т. В спецификациях оборудования должен публиковаться наихудший случай неравенства задержки (в наносекундах) между сигналами яркости и цветности (4,43 МГц) по всем ТВ каналам. Неравномерность ГВЗ проявляется как искажение цветовой передачи и размытость цветовых переходов. Неравномерность характеристики яркость-цветность характеризует амплитудные искажения сигнала цветности с учетом амплитудных искажений сигнала яркости при заданных характеристиках телевизионного сигнала. Линейные искажения сигнала яркости определяются дифференциальным усилением и дифференциальной фазой. Дифференциальное усиление характеризует зависимость амплитуды цветовой поднесущей от уровня сигнала яркости и измеряется по изменению уровня поднесущей 4,43 МГц на ступенчатом сигнале яркости в процентах. Дифференциальная фаза характеризует зависимость фазового сдвига цветовой поднесущей от амплитуды сигнала яркости и определяется как разностью между максимальным и минимальным значениями сдвига фазы поднесущей 4,43 МГц на ступенчатом сигнале яркости. Эти показатели определяют разность времени прохождения сигнала яркости и сигнала цветности, от которого в наибольшей степени зависит качество передаваемого изображения. Согласно EN 50083 в любом телевизионном канале максимальное дифференциальное усиление (от пика к пику) не должно превышать 14%, а максимальная дифференциальная фаза не должна превышать 12 градусов.

Канальная и диапазонная неравномерность АЧХ играет существенную роль при каскадировании активного оборудования. Неравномерность АЧХ каскада обусловлена несколькими факторами. Среди них собственная неравномерность АЧХ используемых усилителей, неравномерность частотных характеристик используемого пассивного распределительного оборудования, низкое качество используемых кабельных разъемов. С увеличением числа включаемых в каскад однотипных усилителей неравномерность АЧХ суммируется, поэтому для поддержания неравномерности каскада в допустимых пределах собственная неравномерность АЧХ усилителей не должна превышать $\pm 0,5$ дБ для протяженных магистральных сетей, $\pm 0,7$ дБ для коротких магистральных сетей, $\pm 1,0$ дБ для домовых распределительных сетей во всей полосе передачи. Неравномерность АЧХ в любой полосе 60 МГц должна быть не более 6 дБ. Стандартные методы измерений неравномерности АЧХ любого элемента кабельной сети подробно описаны в EN-50083. Измерения проводятся с использованием спектроанализатора с 75-омным входом. Особое внимание при измерении следует уделить тому, чтобы все используемое измерительное и соединительное оборудование было согласовано. Тестовые точки, в которых производятся измерения неравномерности АЧХ, должны иметь стандартное сопротивление

Глава 6. Искажения в кабельных системах

75 Ом. Неравномерность АЧХ должна быть измерена с учетом наличия всех устройств автоматической и ручной регулировки усиления, встраиваемых аттенюаторов и других блоков, которыми комплектуется данный элемент системы.

Эффективным методом борьбы с линейными искажениями является применение высококачественных частотных выравнителей (эквалайзеров). Для определения вида АЧХ эквалайзера, который потребуется на данном участке магистрали рекомендуется сначала имитировать этот участок на испытательном стенде вместе с магистральными ответвителями и измерить суммарную АЧХ, что даст представление о характере неравномерностей и о качестве используемого оборудования. Современные качественные эквалайзеры позволяют осуществить плавное выравнивание АЧХ с малыми потерями сигнала. Некоторые модели работают также и в полосе обратного канала.

В идеальном случае частотная характеристика ослабления коаксиального кабеля и частотная характеристика встроенного линейного эквалайзера на данном кабельном участке должны быть зеркальными (или обратными) по отношению друг к другу, но практически это почти никогда не достигается. Несовпадение характеристик приводит к отклонению реальной суммарной АЧХ тракта передачи от равномерной на некоторую величину. По мере увеличения числа кабельных участков и эквалайзеров эта неравномерность будет накапливаться. Заметим, что линейный эквалайзер не компенсирует неравномерность спектра передачи, создаваемую рядом пассивных приборов. Частотная зависимость потерь ответвителей и делителей хотя и слабо выражена, все-таки существует и накапливается в магистрали, содержащей большое число однотипных приборов. Низкое качество кабельных разъемов, рост потерь в которых начинает проявляться на частотах свыше 400 МГц, и неточное соответствие частотных характеристик линейных эквалайзеров характеристикам кабеля также вносят свои доли искажений. Неравномерность еще более увеличивается при подключении домашней сети, в которой часто применяются дешевые абонентские разветвители.

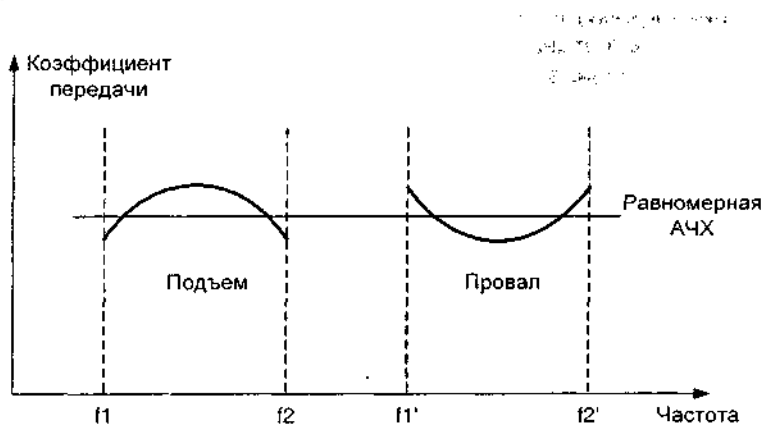


Рис. 6.1. Виды неравномерности АЧХ

В результате наложения множества таких неравномерностей формируется суммарная АЧХ кабельной системы с более сильной неравномерностью в отдельных частотных диапазонах. Возможные варианты неравномерности пред-

6.2. Линейные искажения

ставлены на рис. 6.1. Здесь показано, что суммарная АЧХ внутри некоторого диапазона (f_1, f_2) полосы передачи может отклоняться от прямолинейной либо в сторону падения коэффициента передачи системы на промежуточных частотах диапазона, когда там образуется провал (яма), либо в сторону роста коэффициента передачи на промежуточных частотах диапазона, когда в нем образуется выпуклость (бочка). В том и другом случае причина линейных искажений очевидна – непропорциональное изменение уровней сигналов, передаваемых на разных частотах внутри диапазона с тем или другим отклонением АЧХ. Ширина диапазона, в котором действуют линейные искажения, может быть очень большой, затрагивая десятки ТВ каналов. Так как разные приборы кабельной сети проявляют подобные свойства на разных частотах, итоговая АЧХ системы во всей полосе передачи представляет собой кривую, имеющую несколько провалов и выпуклостей. По этой причине на практике часто бывает очень трудно определить, по какому из каналов лучше осуществлять настройку сети. Разумеется, АЧХ такого вида будет причиной возникновения также и нелинейных искажений, о чем было сказано выше.

6.3. Нелинейные искажения

Существует два вида нелинейных искажений в кабельных системах передачи – интермодуляционные (InterModulation Distortion, IMD) и кроссмодуляционные (CrossModulation Distortion, XMD). Они различаются механизмом происхождения, но все они появляются в результате взаимодействия нескольких одновременно передаваемых сигналов друг с другом и имеют сходное влияние на систему. Нелинейные эффекты не появляются только при прохождении через усилитель одного сигнала, но эта ситуация является чисто теоретической и она не будет рассматриваться. Опишем каждый вид искажений.

Интермодуляция или интермодуляционное искажение (IMD) – согласно определению стандарта EN-50083 – это явление, в результате которого нелинейность оборудования в системе производит ложные выходные сигналы (именуемые интермодуляционными продуктами), частоты которых являются линейными комбинациями частот входных сигналов. Любой периодический сигнал представляет собой сумму конечного числа синусоидальных составляющих (гармоник), частоты которых f_i кратны частоте основной (нулевой) гармоники. В результате прохождения такого полигармонического ТВ сигнала через усилительное устройство, передаточная функция которого выражается нелинейной зависимостью, сигнал на выходе устройства будет являться суммой гармоник следующего общего вида:

$$U_i K = \sin(2\pi F_i t + \Phi_i),$$

где U_i – амплитуда i -й выходной гармоники; K – коэффициент передачи устройства (усиление усилителя); F_i – частота i -й выходной гармоники; Φ_i – фаза (фазовый сдвиг) i -й выходной гармоники; t – время.

Частота i -й выходной гармоники f_i может являться суммой или разностью частот одной или более входных гармоник f , с целыми положительными коэффициентами, что может быть записано в общем виде следующим образом:

$$F_i = p_1 f_1 \pm p_2 f_2 \pm \dots \pm p_N f_N,$$

Глава 6. Искажения в кабельных системах

где p_i – целые положительные числа; N – число гармоник (сигналов).

Следовательно, в выходном сигнале появляется огромное количество новых гармоник, которых не было во входном сигнале. Эти ложные гармоники или, проще говоря, помехи, и являются интермодуляционными продуктами. Частоты, получающиеся в результате сложения и вычитания несущих частот, называют комбинационными частотами, а сами паразитные гармоники называют комбинационными гармониками, комбинационными помехами или биениями. Порядок интермодуляционных искажений определяется частотами взаимодействующих несущих. Интермодуляционным продуктом i -го порядка называется ложный сигнал, у которого сумма коэффициентов в комбинации исходных частот равна i .

$$p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1.$$

Если коэффициент усиления равен K , то амплитуда продуктов искажения i -го порядка будет кратна K^i , поэтому, когда уровни всех входных сигналов увеличиваются на 1 дБ, уровень ложного сигнала i -го порядка продукта искажения возрастает на i дБ, а результирующее отношение сигнал/искажение уменьшается на $(i-1)$ дБ. Это правило является основой для расчета изменения уровня искажения i -го порядка при изменении уровня сигнала. Математически можно доказать, что с увеличением уровней входных сигналов увеличивается относительный вклад составляющих более высокого порядка и, наоборот, если уровни сигналов достаточно малы, то только несколько составляющих наименьшего порядка произведут существенные вклады в искажение выходного сигнала. При тех уровнях сигналов, которые используются в кабельных системах передачи, комбинационные гармоники высоких порядков имеют незначительные амплитуды (сравнимые с амплитудой обычного шума) и ими можно пренебречь. Поэтому на практике всегда ограничиваются расчетом интермодуляционных (комбинационных) помех второго и третьего порядка.

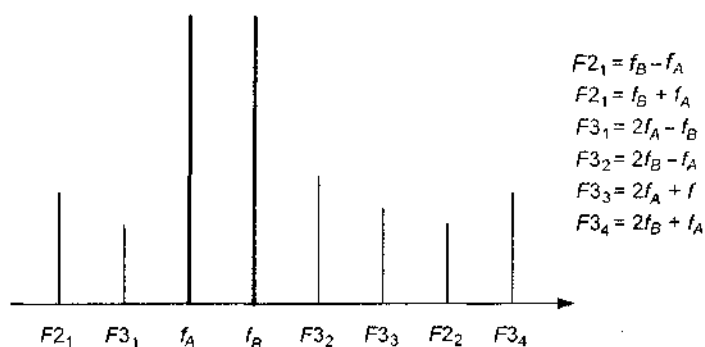


Рис. 6.2. Интермодуляция двух несущих

Интермодуляция второго и третьего порядка начинает сказываться, когда, по крайней мере, два телевизионных сигнала на несущих частотах f_A и f_B в некотором частотном диапазоне одновременно подаются на вход усилителя. На выходе усилителя при этом получаем те же два первоначальных сигнала и помехи второго порядка на частотах $f_A \pm f_B$ или $f_B \pm f_A$, а также помехи третьего порядка на частотах $2f_A \pm f_B$ или $2f_B \pm f_A$ (в зависимости от взаимного расположе-

6.3. Нелинейные искажения

ния частот). Интермодуляционная картина, получаемая при взаимодействии двух несущих для случая $2f_A > f_B$, показана на рис. 6.2. Кроме того, когда через усилитель проходит одновременно более двух полезных сигналов на несущих частотах f_A , f_B и f_C , помехи третьего порядка образуются на частотах $\pm f_A \pm f_B \pm f_C$. Один из возможных вариантов интермодуляционной картины, получаемой при взаимодействии трех несущих, показан на рис. 6.3. Следовательно, гармоники второго порядка это те комбинации, в которых сумма коэффициентов основных частот равна двум, а в гармониках третьего порядка – соответственно трем.

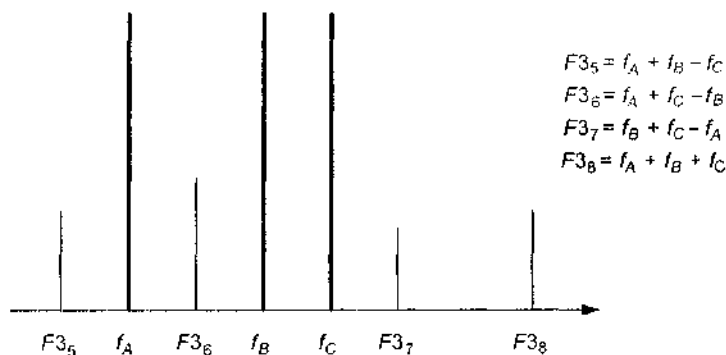


Рис. 6.3. Интермодуляция трех несущих

Как видно из рисунков, при определенном соотношении несущих частот комбинационные гармоники будут попадать в спектр передачи данного ТВ канала или расположенных рядом каналов, создавая помехи полезным сигналам этих каналов. Какие же сигналы, взаимодействуя друг с другом, порождают комбинационные помехи? Появление комбинационных частот может быть обусловлено взаимодействием несущих изображения, звукового сопровождения и цвета, принадлежащих как одному ТВ каналу, так и разным ТВ каналам. При большом количестве транслируемых каналов интермодуляция носит почти хаотический характер и порождает огромное количество паразитных колебаний разного порядка в результате наложения полезных сигналов различных несущих частот в разных комбинациях с разными коэффициентами. Замечено, что в ряде случаев при большом числе каналов биения имеют тенденцию к скоплению в так называемый кластер. Кластер – это группа интермодуляционных продуктов, располагающаяся около несущей изображения или внутри ТВ канала. При регулярной расстановке сигналов с равными частотными интервалами, что является общим случаем для большинства кабельных систем, продукты интермодуляции (особенно третьего порядка) группируются в кластер, делая эти частоты непригодными для передачи полезных сигналов. Количество различных продуктов в каждом кластере быстро увеличивается с ростом числа каналов, и они объединяются различными способами, зависящим от взаимосвязи между частотами исходных сигналов и относительными фазами различных продуктов искажений. Ввиду этого реальная интермодуляционная картина в кабельных сетях с плотным канальным наполнением весьма сложна по своей природе. Есть, правда некоторые правила, которые остаются неизменными. Если входные сигналы лежат в полосе частот шириной менее октавы, то уровни всех частотных составляющих второго порядка будут ослаблены вне иссле-

Глава 6. Искажения в кабельных системах

дуемой полосы пропускания. Сигнальные частоты можно также расположить в двух или более не соприкасающихся смежных диапазонах таким образом, чтобы все составляющие второго порядка лежали вне выделенных полос пропускания. Рост продуктов искажения третьего порядка, как правило, служит ограничивающим фактором широкополосности многоканальной распределительной системы.

Кроссмодуляция или кроссмодуляционное искажение (XMD) – это явление паразитной перекрестной модуляции несущей одного ТВ канала полезным сигналом другого ТВ канала, произвольно отстоящего от него по частоте в полосе системы передачи. Таким образом, кроссмодуляция выражается в наложении (или переносе) модулированной информации от одной несущей к другой и проявляется в выходном сигнале на той же несущей частоте, которую имел полезный входной сигнал, что и делает этот вид искажений особенно сложным. Кроссмодуляция оценивается отношением между амплитудами полезного видеосигнала и паразитного видеосигнала, модулирующего ту же несущую частоту. Более точно, это отношение стопроцентного уровня модуляции несущей, который был бы обеспечен для полезного сигнала, к уровню паразитной модуляции. Величина перекрестной модуляции зависит от коэффициента модуляции мешающего сигнала. Явление комбинированной кроссмодуляции представляет собой перенос амплитудной модуляции от определенного числа интерферирующих модулированных сигналов на несущую немодулированного полезного сигнала.

В соответствии со стандартами ГОСТ Р52023-2003 и EN-50083 интермодуляция измеряется как явление, порождаемое сигналами одного ТВ канала (канальная интермодуляция), так и явление порождаемое сигналами во всей полосе передачи (диапазонная интермодуляция). Кроссмодуляция измеряется для всей полосы передачи как диапазонное искажение. Величина канальной интермодуляции определяется отношением уровня полезного радиосигнала к уровню одночастотной помехи комбинационных частот (второго или третьего порядка), находящейся в полосе данного ТВ канала. Величина диапазонной интермодуляции определяется отношением уровня полезного радиосигнала к уровню составной (ее также называют комбинированной) помехи комбинационных частот, т.е. к суммарному уровню всех частотных составляющих, обязанных своим появлением интермодуляции данного порядка. Для измерения продуктов нелинейных искажений в заданной точке кабельной распределительной системы или устройства используются методы двух несущих, трех несущих и N несущих. Факторами, влияющими на рост продуктов нелинейных искажений, являются увеличение количества передаваемых каналов и каскадирование активных устройств.

Стандартом предусматриваются измерения следующих нелинейных эффектов:

- канальная (одночастотная) интермодуляция второго и третьего порядков, образованная двумя или тремя сигналами в полосе исследуемого канала;
- диапазонная (комбинированная) интермодуляция второго и третьего порядков, образованная множеством сигналов в полосе системы передачи;
- диапазонная (комбинированная) кроссмодуляция, образованная множеством сигналов в полосе системы передачи.

Оценка канальных IMD производится по следующим показателям:

- IMA_3 – интермодуляция третьего порядка, определяемая отношением амплитуды несущей сигнала изображения к амплитуде одночастотной помехи

6.3. Нелинейные искажения

комбинационных частот третьего порядка (дБ);

- IMA_2 – интермодуляция второго порядка, определяемая отношением амплитуды несущей сигнала изображения к амплитуде одночастотной помехи комбинационных частот второго порядка (дБ).

Появление канальных IMD обусловлено взаимодействием несущих частот изображения и звукового сопровождения с цветовой поднесущей на выходе телевизионного модулятора. Исходя из известного взаимного расположения несущих в ТВ канале стандарта SECAM, можно определить, что в полосе ТВ канала помеха третьего порядка будет появляться на комбинационной частоте, отстоящей от несущей изображения на $\pm 2,07$ МГц.

Показателями диапазонных IMD искажений являются:

- CSO (Composite Second Order) – композитная интермодуляция второго порядка, определяемая отношением амплитуды несущей сигнала изображения к амплитуде составной комбинационной помехи второго порядка;

- CTB (Composite Tripple Beat) – композитная интермодуляция второго порядка, определяемая отношением амплитуды несущей сигнала изображения к амплитуде составной комбинационной помехи третьего порядка.

Появление диапазонных IMD обусловлено взаимодействием радиосигналов изображения множества каналов распределения в широкополосном оборудовании кабельной сети. Исходя из известного взаимного расположения несущих в ТВ канале стандарта SECAM, можно определить, что в полосе ТВ канала составная помеха комбинационных частот третьего порядка будет группироваться в области частоты несущей радиосигнала изображения $\pm 0,25$ МГц. Диапазонные искажения, измеряемые по уровню составной помехи комбинационных частот, появляются в результате взаимодействия радиосигналов изображения нескольких ТВ каналов, поэтому CSO или CTB всегда определяются для конкретного числа каналов (N). Чем больше N, тем шире диапазон измерения составной помехи, выше ее уровень, и соответственно меньше величина CSO или CTB.

Диапазонная кроссмодуляция оценивается с помощью показателя CXM (Composite Crossmodulation) – отношение амплитуды радиосигнала с желаемой модуляцией к амплитуде радиосигнала с модуляцией, перенесенной от других несущих в полосе системы. Появление кроссмодуляции обусловлено переносом модуляции от множества интерферирующих модулированных сигналов на немодулированный желательный сигнал.

Методы измерения показателей IMD и XMD подробно описаны в стандарте EN-50083. Канальные интермодуляционные искажения третьего порядка IMA_3 измеряются методом трех несущих (рис. 6.3), имитирующих несущую изображения f_d , несущую звука f_c и несущую цвета f_b в полосе одного ТВ канала. Канальные интермодуляционные искажения второго порядка IMA_2 измеряются методом двух несущих (рис. 6.3), имитирующих две любые несущие в полосе одного ТВ канала. При измерениях плавно увеличивают уровень входного сигнала, сформированного из двух или трех гармонических составляющих равной амплитуды, пока уровень исследуемого интермодуляционного продукта не достигнет предельно допустимого значения по отношению к уровню несущей изображения выходного полезного сигнала. Согласно EN-50083 это предельное отношение составляет 60 дБ. Канальные продукты второго порядка имеют место в системах с полосой пропускания более одной октавы. Канальные продукты третьего порядка встречаются и в широкополосных, и в узкополосных сис-

Глава 6. Искажения в кабельных системах

темах. Показатели СТВ, CSO и СХМ измеряются многосигнальным методом N несущих, расположенных в полосе системы передачи. Стандартная процедура измерения предусматривает следующий порядок действий. Определяется канал, в котором проводится испытание и ссылочный уровень, устанавливаемый для всех несущих в процессе измерений (если все несущие имеют неодинаковые уровни, то в спецификации должен быть указан уровень каждой несущей). В исследуемом ТВ канале измеряется максимальный ссылочный уровень выходного сигнала, при котором достигается предельно допустимое отношение полезного сигнала к комбинированной помехе, которое, согласно EN-50083, составляет 60 дБ. В силу того, что частотное планирование может варьироваться в широких пределах, измерения должны проводиться на несущих, приведенных в табл. 6.1 (разнос между всеми несущими составляет 8 МГц, за исключением частоты 48,25 МГц). В спецификации широкополосного усилителя должно публиковаться наихудшее значение СТВ, CSO и СХМ по всем каналам. Показатели интермодуляции и кроссмодуляции определяются как для отдельных элементов и устройств кабельной системы, так и для всей кабельной системы в контрольных точках.

Таблица 6.1

Сетка частот для измерений отношения радиосигнала к составной помехе комбинационных частот

Частота, МГц	Частота, МГц	Частота, МГц	Частота, МГц
48,25	231,25	439,25	679,25
63,25	247,25	447,25	695,25
79,25	263,25	463,25	711,25
95,25	287,25	479,25	727,25
111,25	311,25	495,25	743,25
127,25	327,25	511,25	759,25
143,25	343,25	527,25	775,25
159,25	359,25	543,25	791,25
175,25	375,25	567,25	807,25
191,25	391,25	583,25	823,25
207,25	407,25	599,25	839,25
223,25	423,25	663,25	855,25

Целью измерения любого из показателей IMD или XMD является получение отношения амплитуды несущей полезного сигнала U_c к амплитуде одночастотной или составной помехи $U_{IMD(K)}$ (интермодуляционной или кроссмодуляционной), порождаемой на выходе усилительного устройства. Необходимо запомнить, что при расчете кроссмодуляции СХМ и интермодуляции СТВ, сталкиваемся с напряжениями сигналов, а при расчете интермодуляции CSO имеем дело с мощностями сигналов. Поскольку амплитуда помехи должна быть ниже амплитуды полезного сигнала, показатели нелинейных искажений выражаются положительными величинами в децибелах. Формулы, определяющие показа-

6.3. Нелинейные искажения

тели "сигнал/помеха" аналогичны формуле, определяющей показатель "сигнал/шум". Определим, в частности, показатели композитных искажений.

Композитная кроссмодуляция:

$$СХМ = 20 \lg \frac{U_C}{U_{ХМД}}.$$

Композитная интермодуляция третьего порядка:

$$СТВ = 20 \lg \frac{U_C}{U_{ИМД3}}.$$

Композитная интермодуляция второго порядка:

$$CSO = 10 \lg \frac{P_C}{P_{ИМД2}}.$$

Здесь U_C – абсолютный уровень несущей полезного сигнала; $U_{ХМД}$ – абсолютный уровень кроссмодуляции на выходе усилителя; $U_{ИМД3}$ – абсолютный уровень составной интермодуляционной помехи 3-го порядка на выходе усилителя; $P_{ИМД2}$ – абсолютный уровень составной интермодуляционной помехи 2-го порядка на выходе усилителя. Величины канальных интермодуляционных показателей $ИМ_2$ и $ИМ_3$ рассчитываются по аналогичным формулам. Строго говоря, определенные таким образом показатели являются не самими искажениями, а обратными величинами по отношению к искажениям, поскольку амплитуда помехи находится в знаменателе, но для удобства изложения здесь используется сложившаяся терминология, согласно которой величины $ИМ$, $СХМ$, $СТВ$, CSO интерпретируются как искажения.

Из этих формул и определения коэффициента усиления усилителя следует, что при постоянном коэффициенте усиления увеличение входного уровня сигнала на усилителе уменьшает нелинейные искажения (показатель увеличивается), и, следовательно, увеличение выходного уровня сигнала увеличивает нелинейные искажения (показатель уменьшается). Так как все показатели выражаются положительными величинами в дБ, то увеличение искажений выражается меньшим значением показателя, а уменьшение искажений выражается большим значением показателя. Например, значение $СХМ$ показателя кроссмодуляции 70 дБ лучше, чем 68 дБ, и означает меньшую степень искажений сигнала. Изменение выходного уровня усилителя на 1 дБ вызывает изменение показателя кроссмодуляции $СХМ$ на 2 дБ. При фиксированной канальной нагрузке повышение выходного рабочего уровня усилителя на 1 дБ приводит к увеличению интермодуляционных искажений (уменьшению $СХМ$) на 2 дБ, а снижение выходного рабочего уровня усилителя на 1 дБ приводит к уменьшению интермодуляционных искажений (увеличению $СХМ$) на 2 дБ. То же самое относится к показателю $СТВ$. Снижение (увеличение) выходного уровня усилителя на 1 дБ приводит к улучшению (ухудшению) $СТВ$ на 2 дБ. Показатель CSO измеряется по закону "10lg" (как и шум), поэтому изменение выходного уровня усилителя на 1 дБ вызывает изменение этого показателя также на 1 дБ, т.е. снижение (увеличение) выходного уровня усилителя на 1 дБ приводит к улучшению (ухудшению) CSO на 1 дБ.

Глава 6. Искажения в кабельных системах

Таким образом, полученное отношение сигнал/помеха (IMA, СХМ, СТВ, CSO) имеет смысл только в сопоставлении с максимальным выходным уровнем $U_{\text{вых max}}$ сигнала, достижимым при данном отношении. Стандарт CENELEC EN-50083 прямо обязывает производителя оборудования приводить в спецификации усилителя те значения выходного уровня, при которых получены указанные показатели СХМ, CSO и СТВ. Если выходной уровень зависит от частоты, это должно быть специально указано. Как становится понятно, все виды нелинейных искажений ограничиваются стандартным (по EN-50083) значением 60 дБ отношения сигнал/помеха, хотя, для некоторых типов усилителей (например, с прямым питанием), для которых невозможно измерить искажения величиной 60 дБ, может быть опубликован выходной уровень для большего отношения сигнал/помеха. Допустимые значения искажений приборов и элементов сети удовлетворяют допустимым величинам искажений на выходе абонентской розетки, при снижении которых ухудшение качества передачи становится заметным в принимаемом изображении (согласно EN-50083 допустимо не менее 54 дБ для IMA и не менее 52 дБ для CSO, СТВ).

Обычно какой-либо один вид интермодуляционных искажений доминирует в системе передачи и именно его требуется ограничивать в первую очередь. В системе этот вид искажений появляется раньше других и имеет наибольший уровень. Какой именно вид искажений требуется ограничивать, зависит от количества транслируемых в сети каналов. При небольшом количестве каналов учитываются только канальные искажения. При увеличении количества каналов в сети композитные помехи начинают играть весьма существенную роль. В соответствии со стандартом EN-50083 для усилителей, предназначенных для работы с менее чем 10 телевизионными каналами, включая обратный канал (до 50 МГц) производитель обязан публиковать только значения канальных интермодуляционных помех второго IMA_2 и третьего IMA_3 порядков. Для широкополосных усилителей (с полосой до 1000 МГц), предназначенных для работы в сетях с более чем 10 каналами, производитель должен указывать композитные показатели несущая/помеха CSO, СТВ и СХМ. Для диапазона до 606 МГц показатели определяются для 29, а для диапазона до 862 МГц – для 42 каналов, которые расставляются по утвержденной частотной сетке подряд, включая пустые каналы. Оценка CSO и СТВ проводят по наихудшему каналу. Для усилителей, работающих в диапазоне частот свыше 862 МГц, использующих только частотно модулированные сигналы, должны указываться в спецификации значения всех помех (одночастотных и составных).

Кроме тех нелинейных искажений, о которых уже было сказано, существуют и другие, которые менее опасны, но также обусловлены интерференцией полезного сигнала ТВ канала с помехами, попадающими в полосу передачи. К этим помехам относятся так называемые побочные помехи, обусловленные взаимодействием сигналов изображения и звукового сопровождения и появляющиеся на комбинационных частотах, отстоящих от частоты несущей изображения на $-6,5$ МГц и на $+13$ МГц. Предельное допустимое отношение сигнала к побочной помехе составляет 57 дБ. Другим подобным видом искажений является фоновая помеха.

Наличие продуктов нелинейных искажений желательно учитывать при составлении частотного плана. Правильное взаимное расположение несущих частот внутри спектра системы передачи способно повысить показатели качества системы передачи. Способ расположения частот не снижает продукты ин-

термодюляции, но может улучшить их совместимость с частотами полезных сигналов. Нужно постараться так расположить частоты каналов, чтобы большая часть комбинационных помех оказалась вне основной полосы видеосигнала, занимающей около 6 МГц. Амплитудно-модулированные телевизионные сигналы передаются с не полностью подавленной боковой полосой, поэтому если продукты искажений попадают в эту боковую полосу, то они причинят видеоинформации гораздо меньший вред, чем в случае попадания в основную полосу или, что еще хуже, прямо на несущую (кроссмодуляция). Существует возможность управления частотами продуктов интермодуляции при составлении частотного плана. Правильный расчет CSO и CTB позволяет расставить каналы вне зависимости от кластеризации помех и устранить или, по крайней мере, минимизировать их влияние. Например, попытаемся установить правило, позволяющее снизить помехи CSO. Помня о том, что CSO появляются на суммарной или разностной частотах двух несущих, воспользуемся простым арифметическим правилом – сумма или разность двух нечетных чисел всегда дает четное число и сумма или разность двух четных чисел также дает четное число. Следовательно, в целях полного исключения влияния CSO на транслируемые каналы, нужно использовать только каналы с нечетными номерами (R7, S21, K23 и т.д.). Кроссмодуляция на экранах телевизионных приемников проявляется в виде наложения одного канала на другой. Практика показывает, что устранить ее невозможно ни правильной частотной расстановкой каналов, ни последующей фильтрацией.

6.4. Показатели CTB, CSO, CXM усилителя

Основная задача широкополосного усилителя кабельной системы заключается в том, чтобы по каждой несущей частоте передать на выход значительную РЧ энергию. Как правило, для этого в структуре усилителя основной усилительный модуль разбивается на несколько ступеней усиления (обычно две), каждая из которых вносит свой вклад в усиливаемый сигнал. Последняя (выходная) ступень усилителя должна иметь высокую линейность, что очень трудно обеспечить одновременно с высоким усилением. Это обстоятельство осложняется тем фактом, что в широкополосных коаксиальных системах множество усилительных устройств содержат только одну ступень усиления. Поскольку выходная ступень усилителя имеет наибольшее усиление по мощности и работает с высоким уровнем сигнала, то вклад выходного каскада в искажение выходного сигнала почти полностью принадлежит ей. Чем более высокого уровня сигнал подается на выходную ступень усилителя, тем более сильные искажения она вносит. Ранее при изучении шума приводилась диаграмма, на которой были наглядно сопоставлены показатель шума F и уровень входного сигнала с отношением S/N . Это было возможно, поскольку природа шума была одинакова для всех сигналов, коэффициенты шума для всех усилителей определялись одинаково, а уровень шума считался равномерно распределенным по всему спектру системы передачи. В случае с любым видом нелинейных искажений дело обстоит иначе. Свойство усилителя вносить искажения в усиливаемый сигнал имеет индивидуальные особенности для каждого устройства и зависит от его частотной характеристики. Поэтому подобная диаграмма была бы применима только к какому-либо конкретному усилителю и только в условиях определенной канальной нагрузки. Это отражено в документации произво-

Глава 6. Искажения в кабельных системах

дителя на каждый усилитель. Как уже было сказано, указывая показатели интермодуляционных искажений усилителя, производитель обязан не только количественно определить их значения, но также дать ссылку на уровень выходного сигнала, при котором это значение было измерено. В свою очередь, данный уровень выходного сигнала определяется для конкретной канальной нагрузки (количество РЧ несущих).

Существуют такие способы разработки оборудования, которые позволяют снизить уровни нелинейных искажений на некоторую величину. Например, двухтактная схема (push-pull) выходной ступени сильно снижает продукты интермодуляции 2-го порядка и поэтому, сегодня при проектировании кабельных систем искажения 2-го порядка, как правило не являются ограничением. Построение усилителя по схеме «с предварительным питанием» (feed forward) предоставляет очень большое преимущество в смысле снижения интермодуляционных искажений, хотя и создает дополнительные трудности ввиду сложности этой схемы. Еще одна схема усилителя, позволяющая эффективно бороться с искажениями, называется схемой «удвоения мощности» (power doubling). Необходимо понимать, что хотя современные усилители и обладают превосходными выходными характеристиками, процесс ограничения накапливающихся интермодуляционных искажений должен быть обеспечен во всей системе, и даже очень качественный усилитель нельзя рассматривать как идеальный.

Разберемся, как показатели интермодуляции и кроссмодуляции задаются в спецификации оборудования и как они рассчитываются, исходя из этих данных. Значение любого показателя интермодуляции и кроссмодуляции всегда задается в спецификации в паре со значением (значениями) максимального выходного уровня полезного сигнала. По определению, максимальный уровень напряжения радиосигнала на выходе активного устройства – это максимально допустимый уровень напряжения радиосигнала на выходе устройства, определяемый показателем нелинейных искажений. Из определения IMA_3 “20lg” следует формула, позволяющая рассчитать значение интермодуляции третьего порядка, которое будет создавать усилитель при некотором выходном рабочем уровне S :

$$IMA_3 = IMD_0 + 2(S_{0IMD3} - S).$$

Здесь IMD_0 – определенный стандартом или спецификацией производителя предельно допустимый показатель интермодуляции (60 дБ согласно EN-50083); S – рабочий выходной уровень сигнала (дБ·мВ); S_{0IMD3} – определенный спецификацией производителя максимальный выходной уровень (дБ·мВ), соответствующий предельно допустимому IMD_0 . Пара значений (IMD_0 и S_{0IMD3}) содержится в спецификации производителя на данный усилитель. Разработчик, желая установить для этого усилителя свой уровень выходного сигнала, может по этой формуле определить, каков при этом будет уровень интермодуляции. Очевидно, при рабочем уровне, большем максимального ($S > S_{0IMD3}$), величина искажений превысит установленное стандартом допустимое значение 60 дБ, а при меньшем уровне ($S < S_{0IMD3}$) величина искажений будет находиться в допустимых пределах.

Таким образом, максимальным уровнем выходного сигнала S_0 (по EN-50083) называется именно тот уровень, при котором $IMD_0 = 60$ дБ. Если производитель

6.4. Показатели СТВ, CSO, CXM усилителя

использует предельное значение IMD_0 , отличное от стандартного 60 дБ (по EN-50083), он должен явно указать это значение в спецификации. В любом случае, должно быть гарантировано, что при выбранном выходном уровне усилитель не создает искажений, более сильных, чем указано в спецификации.

Выходной уровень в дБ·мВ можно найти по уже известной формуле:

$$S_0 = 20 \lg U_{\text{вых max(мВ)}} \text{ (дБ·мВ)}.$$

Из определения IMA_2 "10lg" следует формула, позволяющая рассчитать значение интермодуляции второго порядка, которое будет создавать усилитель при некотором выходном рабочем уровне S :

$$IMA_2 = IMD_0 + (S_{0IMD2} - S).$$

Здесь IMD_0 – определенный стандартом или спецификацией производителя предельно допустимый показатель интермодуляции (60 дБ согласно EN-50083), S – требуемый рабочий выходной уровень сигнала (дБ·мВ), S_{0IMD2} – определенный спецификацией максимальный выходной уровень (дБ·мВ), соответствующий предельно допустимому IMD_0 . Пара значений (IMD_0 и S_{0IMD2}) также должна содержаться в спецификации на усилитель.

Заметим, что для каждого вида искажений должно быть указано свое значение максимального выходного уровня S_0 . В общем случае эти уровни различаются, так как искажения разных видов растут с разной скоростью. Важно иметь в виду, что при одном и том же выходном уровне усилителя, отношение СТВ всегда будет больше отношения CSO ($IMA_3 > IMA_2$), или, что то же самое, при одном и том же показателе допустимых искажений выходной уровень S_{0IMD2} всегда будет больше выходного уровня S_{0IMD3} . Это объясняется тем, что искажения второго порядка растут медленнее, чем искажения третьего порядка. В силу этого при изучении технической документации усилителя следует обратить внимание на заявляемые значения максимальных выходных уровней и показателей интермодуляции и, если это условие не выполняется, следует осторожно относиться к данным спецификации.

Аналогичные формулы существуют и для диапазонных показателей:

$$CTB = CTB_0 + 2(S_{0CTB} - S),$$

$$CSO = CSO_0 + (S_{0CSO} - S),$$

$$CXM = CXM_0 + 2(S_{0CXM} - S),$$

где CXM_0 , CTB_0 и CSO_0 – определенные стандартом или спецификацией производителя предельно допустимые показатели нелинейных искажений (60 дБ согласно EN-50083), S – требуемый рабочий выходной уровень сигнала (дБ·мВ), S_{0CXM} , S_{0CTB} и S_{0CSO} – определенные спецификацией максимальные выходные уровни (дБ·мВ), соответствующие значениям CXM_0 , CTB_0 и CSO_0 .

Следует обратить внимание, что максимальные выходные уровни S_{0CTB} и S_{0CSO} здесь другие, отличные от тех, что были определены для канальных показателей нелинейных искажений S_{0IMD3} и S_{0IMD2} , поскольку максимальные уровни для диапазонных искажений зависят от числа транслируемых каналов. Эту зависимость рассмотрим далее, а пока приведем несколько примеров расчета показателей кросс и интермодуляции усилителя с помощью этих формул.

Пример 1

Допустим, разработчик определил, что рабочий выходной уровень усилителя при передаче 12 каналов должен быть равен +40 дБ·мВ. Тогда рабочее значение СХМ усилителя будет равно:

$$СХМ = СХМ_0 + 2 (S_{0СХМ} - S) = 57 + 2(60 - 40) = 97 \text{ дБ.}$$

Если увеличить выходной уровень с +40 дБ·мВ до +41 дБ·мВ, то показатель кроссмодуляции становится равным:

$$СХМ = СХМ_0 + 2 (S_{0СХМ} - S) = 57 + 2(60 - 41) = 95 \text{ дБ.}$$

Из этих расчетов видно, что увеличение выходного уровня на 1 дБ действительно приводит к ухудшению кроссмодуляции на 2 дБ, поскольку значение 95 дБ на 2 дБ ниже, чем 97 дБ. С другой стороны, также можно проверить, что уменьшение выходного уровня на 1 дБ приведет к улучшению показателя СХМ на 2 дБ, до значения 88 дБ.

Пример 2

Определить уровень интермодуляции 3-го порядка на выходе канального усилителя, для которого задано $S_{0IMD3} = 113$ дБ·мкВ (при $IMD_0 = 54$ дБ), при установке рабочего $S = 100$ дБ·мкВ.

$$IMA_3 = IMD_0 + 2(S_{0IMD3} - S) = 54 + 2(113 - 100) = 80 \text{ дБ.}$$

Поставим обратную задачу: определить уровень сигнала, который может быть установлен на выходе того же усилителя для достижения $IMA_3 = 60$ дБ. Для решения преобразуем формулу к более удобному виду:

$$S = S_{0IMD3} - (IMA_3 - IMD_0)/2 = 113 - (60 - 54)/2 = 110 \text{ дБ·мкВ.}$$

Пример 3

Определить показатели канальной интермодуляции для усилителя, в спецификации которого указаны максимальные выходные уровни (по стандарту EN-50083): $S_{0IMD2} = 118$ дБ·мкВ и $S_{0IMD3} = 126$ дБ·мкВ, при установке на его выходе рабочего уровня $S = 110$ дБ·мкВ.

$$IMA_2 = IMD_0 + (S_{0IMD2} - S) = 60 + (118 - 110) = 68 \text{ дБ.}$$

$$IMA_3 = IMD_0 + 2(S_{0IMD3} - S) = 60 + 2(126 - 110) = 92 \text{ дБ.}$$

Можно сделать следующие предварительные выводы. Меняя рабочий уровень сигнала на выходе усилителя, можно регулировать уровень производимых им интермодуляционных искажений. В выборе рабочего выходного уровня разработчик имеет некоторую свободу и может работать как с более высокими, так и с более низкими уровнями сигнала, чем указано (S_0) в спецификации данного усилителя. Данные производителем рабочие уровни усилителя служат для описания рабочих характеристик усилителя и их не следует воспринимать как жесткие значения, которым нужно следовать в точности. Единственным обязательным требованием является соблюдение всех качественных характеристик в оконечных точках системы, т.е., не допускается идти на компромисс с ухудшением качества обслуживания абонента. Отступление от спецификации в значениях уровней сигнала не только возможно, но даже в некоторых случаях необходимо. Превышение выходного уровня, разумеется, приведет к росту ис-

6.4. Показатели СТВ, CSO, СХМ усилителя

кажений, но если в системе или участке системы ограниченной протяженности установлен небольшой каскад усилителей (например, в масштабе одного здания), то увеличение показателя СХМ может находиться в допустимых пределах и качество передачи по-прежнему останется удовлетворительным. Понижая рабочий выходной уровень, получаем меньший уровень искажений на каждом усилителе, и, в результате, меньшие искажения на выходе всего каскада. Такой подход применяется в каскадах усилителей очень большой протяженности.

Типичная спецификация широкополосного усилителя имеет следующий вид.

Количество ТВ каналов	62
Ширина полосы передачи	5 – 1000 МГц
Входной рабочий уровень сигнала	+10 дБ·мВ
Выходной рабочий уровень сигнала	+31 дБ·мВ
Интермодуляция третьего порядка IMA_3	105 дБ
Композитная интермодуляция третьего порядка СТВ	80 дБ
Композитная интермодуляция второго порядка CSO	83 дБ
Композитная кроссмодуляция СХМ	78 дБ

В этих данных, производитель предоставляет всю необходимую информацию о канальной нагрузке системы, входных и выходных уровнях сигнала и различных видах интермодуляционных искажений. Показатель СТВ рассчитывается аналогично СХМ. Для примера, приведенного в данной спецификации, при увеличении выходного уровня на 1 дБ СТВ уменьшится с 80 дБ до 78 дБ. С другой стороны, уменьшение выходного уровня на 1 дБ (с +31 дБ·мВ до +30 дБ·мВ) вызовет улучшение значения СТВ на 2 дБ, т.е. с 80 дБ до 82 дБ. При расчете показателя CSO нужно помнить, что изменение выходного уровня на 1 дБ вызывает изменение также на 1 дБ.

Факторами, влияющими на рост продуктов нелинейных искажений, создаваемых системой передачи, являются:

- увеличение количества транслируемых каналов;
- каскадирование активных устройств (увеличение числа усилителей в системе).

Оба фактора отражаются в расчете этих показателей и соответствующих им уровней выходных сигналов. Влияние каскадирования будет рассмотрено в следующем параграфе, а здесь рассмотрим влияние первого фактора. Поскольку при увеличении числа транслируемых каналов нелинейные искажения возрастают, реальное значение рабочего выходного уровня сигнала будет уменьшаться при фиксированном показателе IMD или XMD. Этот закон можно сформулировать и по-другому: при увеличении числа транслируемых каналов значение показателя IMD или XMD будет уменьшаться при фиксированном рабочем выходном уровне сигнала.

В соответствии с этими двумя вариантами формулировки одного и того же правила роста нелинейных искажений возможны два способа задания пар значений IMD (XMD) и S_0 в спецификациях оборудования или системы передачи. Умение пользоваться спецификацией, заданной тем или другим способом, позволит рассчитать показатели IMD (XMD) для любого рабочего уровня сигнала и любого количества каналов. Покажем это на примере расчета показателя СХМ.

Пример 4

Допустим, производитель определил следующие параметры в спецификации усилителя.

Показатель кроссмодуляции $СХМ_0 = 57$ дБ.

Выходной уровень сигнала S_{0XMD} :

+54,5 дБ·мВ – при передаче 12 каналов,

+52,5 дБ·мВ – при передаче 21 канала,

+50,5 дБ·мВ – при передаче 35 каналов.

Эти данные означают следующее. Если используется этот усилитель в системе с 12 каналами, то при обеспечиваемом им уровне выходного сигнала +54,5 дБ·мВ он будет создавать кроссмодуляционные искажения с уровнем 57 дБ. Тот же усилитель, используемый в 35-канальной системе, должен обеспечивать меньший выходной уровень +50,5 дБ·мВ, чтобы создавать тот же уровень кроссмодуляционных искажений 57 дБ.

Пример 5

Дана следующая спецификация усилителя:

выходной уровень $S_{0XMD} = +34$ дБ·мВ,

показатель кроссмодуляции СХМ:

98 дБ – при передаче 12 каналов,

94 дБ – при передаче 21 канала,

90 дБ – при передаче 35 каналов.

Это означает, что если используется этот усилитель в системе с 12 каналами, то при обеспечиваемом им уровне выходного сигнала +34 дБ·мВ он будет создавать уровень кроссмодуляционных искажений 98 дБ. Тот же усилитель, используемый в 35-канальной системе и обеспечивающий тот же выходной уровень +34 дБ·мВ, будет создавать уровень кроссмодуляционных искажений 90 дБ.

Теперь сопоставим данные двух спецификаций из примеров 4 и 5. Для этого воспользуемся установленным ранее правилом, что изменение выходного уровня усилителя на 1 дБ порождает изменение уровня интермодуляционных искажений на 2 дБ. Во второй спецификации определено, что для 12 каналов при выходном уровне +34 дБ·мВ усилитель будет создавать значение СХМ, равное 98 дБ.

В первой спецификации определено, что для 12 каналов при выходном уровне +54,5 дБ·мВ усилитель будет создавать значение СХМ, равное 57 дБ. Посмотрим, что произойдет, если данный во второй спецификации выходной уровень +34 дБ·мВ будет увеличен до значения +54,5 дБ·мВ (т.е. на 20,5 дБ). Как известно, при увеличении выходного уровня на 1 дБ произойдет увеличение значения кроссмодуляции на 2 дБ. Поэтому, если увеличить выходной уровень на 20,5 дБ, значение СХМ уменьшится (станет хуже) на 41 дБ и будет составлять 57 дБ (98 – 41). И наоборот, попробуем снизить значение выходного уровня, данное в первой спецификации +54,5 дБ·мВ до значения +34 дБ·мВ, данного во второй спецификации.

Эта разница также составляет 20,5 дБ, но снижение выходного уровня на 1 дБ будет создавать снижение кроссмодуляционных искажений на 2 дБ. Поэтому, если уменьшить выходной уровень на 20,5 дБ, то значение СХМ увеличится (станет лучше) на 41 дБ. Следовательно, уровень кроссмодуляции станет равным 98 дБ (57 + 41). Получен тот же результат, что доказывает тождественность данных первой и второй спецификации. Таким образом, информация может быть корректно интерпретирована, несмотря на то, в каком виде она представлена в спецификации.

Пример 6

Найти значения CSO и СТВ усилителя, для которого спецификацией определены максимальные уровни $S_{0IMD2} = 118$ дБ·мкВ и $S_{0IMD3} = 126$ дБ·мкВ (по EN-50083), при трансляции 20 каналов и рабочем выходном уровне $S = 110$ дБ·мкВ.

$$\begin{aligned} СТВ &= СТВ_0 + 2(S_{0СТВ} - S) = \\ &= СТВ_0 + 2(S_{0IMD3} - 5\lg(20/2) - S) = 60 + 2(126 - 110 - 5\lg 10) = 82 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CSO &= CSO_0 + 2(S_{0CSO} - S) = \\ &= CSO_0 + (S_{0IMD2} - 3,2 \lg(20/2) - S) = 60 + (118 - 110 - 3,2 \lg 10) = 65 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Расчет подтверждает тот факт, что искажения второго порядка растут медленнее, чем искажения третьего порядка.

6.5. Расчет нелинейных искажений в каскаде усилителей

Вторым важнейшим фактором роста нелинейных искажений является увеличение количества активных устройств в каскаде. Рост искажений обусловлен тем же явлением, что и рост шума в каскаде, а именно, накоплением помех. Установлено, что два вида искажений – СТВ и СХМ – быстрее всего накапливаются в каскаде усилителей, так как их накопление происходит по закону второй степени (суммирование уровней по напряжению). Интермодуляционные искажения второго порядка CSO накапливаются по закону первой степени (суммирование уровней по мощности), т.е. не так быстро, как СТВ и СХМ. Как и в случае расчета шума каскада существует два метода расчета нелинейных искажений в каскаде. Метод комбинирования подходит для быстрых оценочных расчетов больших каскадов, а аналитический метод применяется для точных расчетов общих показателей каскада, составленного из любых усилителей.

Комбинирование – это метод расчета общих показателей каскада с помощью логарифмических диаграмм. Существуют диаграммы для комбинирования любого количества равных и двух неравных значений IMD (XMD) усилителей или блоков, представляющих собой также каскады, но меньшего размера. Комбинирование равных значений предполагает, что все усилители (или блоки) в каскаде идентичны, т.е. имеют одинаковые характеристики и работают при одинаковых выходных уровнях.

На рис. 6.4 показано соотношение между значением СХМ каскада усилителей и количеством усилителей в предположении, что все усилители одинаковы. Пользоваться этой диаграммой для определения результирующего показателя кроссмодуляции СХМ также просто, как при определении показателя C/N для каскада усилителей в предыдущей главе. Из диаграммы видно, что при каждом увеличении числа усилителей вдвое получим значение СХМ, которое меньше каждого из комбинируемых значений на 6 дБ. Например, комбинируя каскад, у которого СХМ равен 70 дБ, с таким же каскадом, получаем, что итоговый показатель СХМ равен 64 дБ.

Этой диаграммой удобно пользоваться при составлении каскада из числа одинаковых блоков, кратного двум, при известном показателе СХМ одного блока. Например, каскад, составленный из 8 блоков, каждый из которых имеет СХМ, равный 80 дБ, будет иметь общий СХМ, равный 62 дБ. Для комбинирова-

Глава 6. Искажения в кабельных системах

ния любого количества n одинаковых значений СХМ можно пользоваться следующей формулой, дающей точный результат:

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ - 20 \lg n,$$

где $СХМ_{\Sigma}$ – показатель кроссмодуляции каскада усилителей (дБ); $СХМ$ – показатель кроссмодуляции одного усилителя (дБ); n – количество усилителей в каскаде.

Предположим, что отдельный усилитель производит кроссмодуляцию с уровнем 86 дБ. Тогда каскад из 10 таких же усилителей будет создавать кроссмодуляцию:

$$СХМ_{\Sigma} = 86 - 20 \lg 10 = 66 \text{ дБ.}$$



Рис. 6.4. Комбинирование равных СХМ

Добавим к этому каскаду такой же каскад из 10 таких же усилителей. Тогда полный каскад из 20 усилителей будет создавать кроссмодуляцию:

$$СХМ_{\Sigma} = 86 - 20 \lg 20 = 60 \text{ дБ.}$$

Заметим, что разность между этими результатами составляет 6 дБ, что полностью согласуется с нашим первоначальным утверждением. Поэтому нет необходимости каждый раз повторять подобные расчеты для комбинирования двух равных значений ХМ, а достаточно воспользоваться диаграммой, приведенной на рис. 6.4. Следует иметь в виду, что при использовании этой диаграммы определяющим фактором является не абсолютное число усилителей, а увеличение количества одинаковых усилителей в каскаде в два раза. Все сказанное в той же мере относится и к расчету показателя СТВ. Для комбинирования любого количества n одинаковых значений СТВ существует следующая формула:

6.5. Расчет нелинейных искажений в каскаде усилителей

$$CTB_{\Sigma} = CTB - 20 \lg n,$$

Комбинирование любого количества n равных значений CSO происходит подобным образом, но только по закону первой степени:

$$CSO_{\Sigma} = CSO - 10 \lg n.$$

Диаграммы для расчета CTB_{Σ} и CSO_{Σ} аналогичны диаграмме на рис. 6.4.

Для комбинирования двух неравных показателей CXM , CTB или CSO используются диаграммы, аналогичные показанной на рис. 6.5. Этой диаграммой можно воспользоваться в случае каскадирования двух усилителей или двух блоков (каскадов), имеющих разные показатели CXM . Например, она позволяет рассчитать общий показатель каскада, получаемого при добавлении каскада из 5 усилителей к каскаду из 12 усилителей, когда все усилители имеют одинаковые значения CXM . В равной степени это применимо и к случаю объединения двух каскадов, в каждом из которых количество усилителей одинаково, но значения CXM различаются.

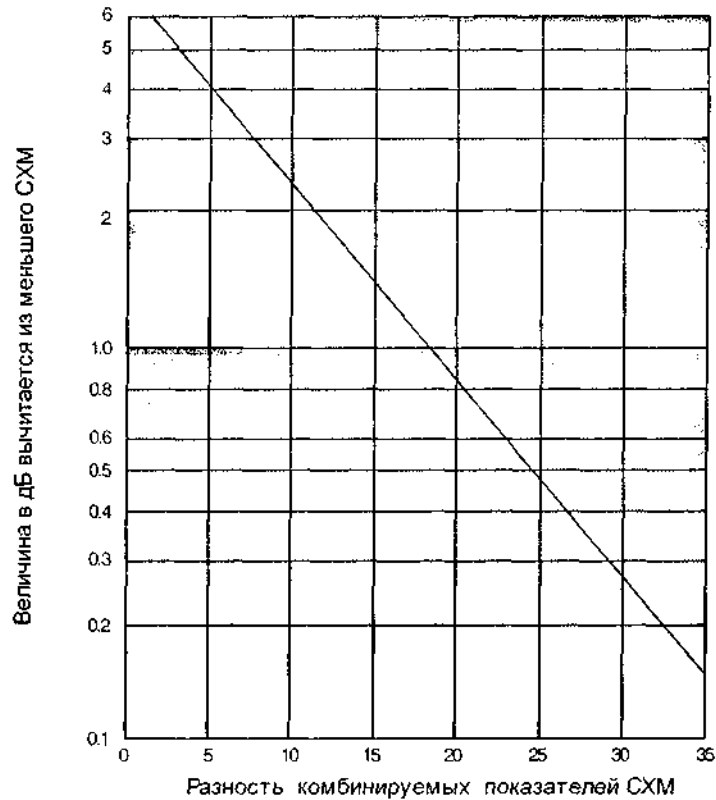


Рис. 6.5. Комбинирование неравных CXM

Проверим соответствие результатов, полученных комбинированием с помощью диаграммы, и результатов, полученных аналитическим путем. Предположим, есть каскад, состоящий из 15 усилителей, и каждый усилитель имеет

Глава 6. Искажения в кабельных системах

значение СХМ = 83 дБ. Допустим, необходимо расширить каскад добавлением еще 3 усилителей, имеющих значение СХМ = 64 дБ. Сначала вычислим значения СХМ отдельно для каждого из комбинируемых каскадов.

Для первого каскада: $SXM_{\Sigma} = 83 - 20 \lg 15 = 59,5$ дБ.

Для второго каскада: $SXM_{\Sigma} = 64 - 20 \lg 3 = 54,5$ дБ.

Разность между этими двумя значениями составляет 5 дБ. По диаграмме на рис. 6.5 находим, что значению 5 дБ на горизонтальной шкале соответствует 4 дБ на вертикальной шкале. Это значение указывает, что следует прибавить 4 дБ к худшему из двух значений СХМ. Очевидно, значение 54,5 дБ выражает худшее значение СХМ, чем 59,5 дБ, поэтому результирующее значение СХМ для всего каскада из 18 усилителей будет составлять $54,5 - 4 = 50,5$ дБ.

Этот пример является типичным примером расчета комбинированных показателей IMD и XMD при проектировании системы "транк-фидер", о которой будет говориться позднее. Заметим, что эта диаграмма и предложенная здесь методика расчета равно применима для комбинирования любых показателей кроссмодуляции и интермодуляции. Причем, ее применение возможно вне зависимости от типа и расположения источника интермодуляционных искажений, которым может быть не только усилитель, но и любое другое активное звено системы, находящееся в любой точке системы. Например, если перед подачей сигналов в распределительную кабельную сеть используется радиорелейный участок, то значение СХМ, создаваемое этим радиорелейным участком, комбинируется со значением СХМ, вносимым кабельной сетью.

При определении результирующего СХМ для наихудшего случая (для наиболее удаленной абонентской точки) потребуются комбинировать множество, как правило, неравных значений СХМ. Как показано, это легко сделать с помощью рис. 6.5 для двух значений. Если требуется комбинировать более чем два неравных значения, то самый простой метод состоит в комбинировании сперва любых двух значений, а затем комбинировании полученного результата с любым из оставшихся значений, и так далее до последнего оставшегося значения. Рассмотрим пример системы, включающей радиорелейный участок, каскад транковых усилителей и каскад фидерных усилителей. Все три участка системы характеризуются разными значениями СХМ. Предположим, что СХМ радиорелейного участка равно 82 дБ, СХМ каскада транковых усилителей равно 59,5 дБ, а СХМ каскада фидерных усилителей равно 54,5 дБ. С помощью диаграммы комбинируем сначала значения 82 дБ и 59,5 дБ. Получаем, что общее СХМ этих двух участков равно 58,8 дБ. Для учета влияния третьего участка комбинируем значения 54,5 дБ и 58,8 дБ, что дает в результате 50,7 дБ для показателя СХМ всей системы в целом.

Необходимо помнить, что в системе передачи более 10 каналов потребуются расчеты не только СХМ, но и расчеты СТВ и CSO.

Аналитический метод позволяет получить общие показатели IMD и XMD системы, состоящей из любого количества усилителей (блоков) с равными или неравными показателями IMD и XMD.

При каскадировании n канальных устройств суммарный показатель IMA_{Σ} вычисляется по формуле:

$$IMA_{\Sigma} = -20 \lg (10^{-IMA_{31}/20} + 10^{-IMA_{32}/20} + \dots + 10^{-IMA_{3n}/20}).$$

6.5. Расчет нелинейных искажений в каскаде усилителей

Эта формула показывает, что при каскадном включении двух активных устройств с равными IMA_3 итоговое $IMA_{3\Sigma}$ понизится на 6 дБ по сравнению с каждым, т.е. дает тот же результат, что и метод комбинирования.

При каскадировании n канальных устройств суммарный показатель IMA_2 вычисляется по формуле:

$$IMA_{2\Sigma} = -10 \lg(10^{-IMA_{21}/10} + 10^{-IMA_{22}/10} + \dots + 10^{-IMA_{2n}/10}).$$

При каскадировании n широкополосных устройств суммарные показатели CXM_Σ , CTB_Σ и CSO_Σ вычисляются по формулам:

$$CTB_\Sigma = -20 \lg(10^{-CTB_1/20} + 10^{-CTB_2/20} + \dots + 10^{-CTB_n/20}),$$

$$CXM_\Sigma = -20 \lg(10^{-CXM_1/20} + 10^{-CXM_2/20} + \dots + 10^{-CXM_n/20})$$

$$CSO_\Sigma = -10 \lg(10^{-CSO_1/10} + 10^{-CSO_2/10} + \dots + 10^{-CSO_n/10}).$$

Эти формулы выражают законы накопления нелинейных искажений в системе передачи при каскадировании активных устройств (антенные усилители, головная станция, оптическая система, магистральные усилители, домовые усилители). Наряду с аналогичной формулой расчета C/N_Σ (см. гл. 5), они являются ключевыми для синтеза распределительной сети при известных показателях отдельных усилителей или блоков, например, домовых и магистральных усилителей.

Теория и практика показывают, что канальные искажения, сформированные на выходе головной станции, далее практически не ухудшаются в широкополосных усилителях. Исходя из результирующих показателей IMD и XMD, полученных методом комбинирования или аналитическим методом, разработчик оценивает получаемые показатели на выходе абонентской розетки и при необходимости, если показатели выходят за рамки допустимых, корректирует уровни передаваемых сигналов в сети или меняет количество усилителей в каскаде или принимает решение о выборе другого оборудования с лучшими характеристиками. В процессе расчетов каскада магистральных усилителей применительно к конкретным участкам сети проводят корректировку выходного уровня только в сторону понижения (там, где это возможно) или сохраняют неизменным.

Пример 7

Определить уровень канальных искажений третьего порядка, формируемых на выходе головной станции с собственным $IMA_3 = 60$ дБ и канальным мачтовым усилителем с $IMA_3 = 70$ дБ.

$$IMA_{3\Sigma} = -20 \lg(10^{-60/20} + 10^{-70/20}) = 57,6 \text{ дБ.}$$

Пример 8

Определить показатели CTB_Σ и CSO_Σ системы, включающей головную станцию, оптический приемник, магистральный усилительный каскад из 3 усилителей и один домовый усилитель, если собственные показатели на выходе элементов составляют: $CSO = 72$ дБ, $CTB = 65$ дБ для головной станции; $CTB = 84$,

Глава 6. Искажения в кабельных системах

CTB = 65 дБ для оптической системы; CSO = 74 дБ, CTB = 82 дБ для магистральных усилителей; CSO = 72 дБ, CTB = 66 дБ для домового усилителя.

Подставляя данные в формулы, получаем $CSO_{\Sigma} = 62,5$ дБ, $CTB_{\Sigma} = 57,3$ дБ.

6.6. Интермодуляция и выравнивание амплитуд

Величина нелинейных искажений зависит, кроме всего прочего, от того, какой способ выравнивания спектра передачи применяется в усилителе. На рис. 6.6 изображена структурная схема усилителя с эквалайзерами на входе и выходе. Сам усилительный модуль состоит из двух ступеней усиления, коэффициенты усиления которых равны K_1 и K_2 . Так строится большинство усилителей, даже если они создаются на основе интегральных или гибридных схем. На вход первой ступени поступает сигнал относительно низкого уровня. Эта ступень не создает существенного усиления ($K_1 \ll K_2$), и, поэтому она не вносит каких-либо значительных нелинейных искажений. Создавая сигналы равных уровней, эта ступень сохраняет наилучшее (высокое) отношение C/N для сигналов всех каналов и обеспечивает усиление, достаточное для того, чтобы нелинейные искажения, вносимые выходной ступенью усилителя, находились в допустимых пределах. Для связи между двумя ступенями усиления в схеме устройства применяются различные варианты АРУ и АРН с обратной связью. Атенюатор (Атт) нужен для создания на входе первой ступени требуемого уровня сигнала, зависящего от внутренних характеристик этой ступени. Выходная ступень усилителя обеспечивает наибольшую долю усиления (K_2). Поскольку значение коэффициента шума этой ступени несущественно, то основной ее задачей будет передача на выход наибольшей мощности сигнала при максимальной линейности. При таком подходе вносимые усилителем интермодуляционные искажения можно удерживать на относительно низком уровне.

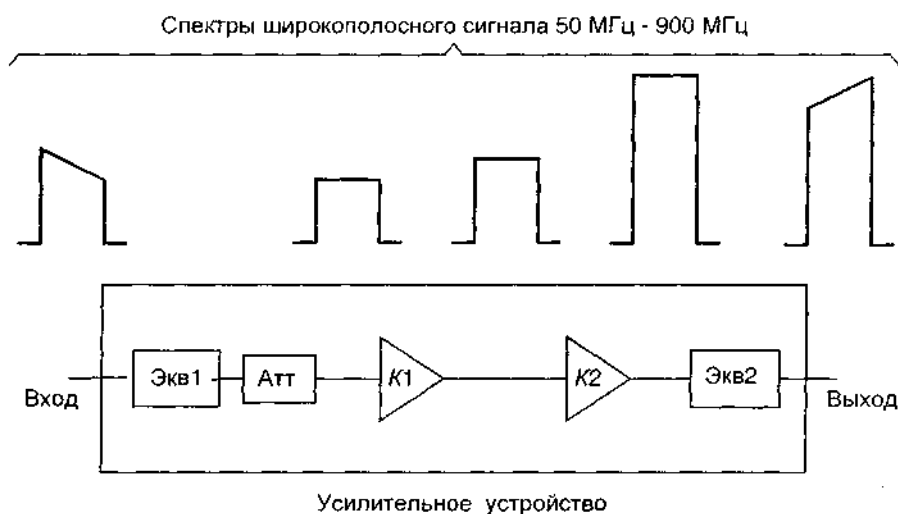


Рис. 6.6. Выравнивание на входе и выходе

Характер наклона спектра выходного сигнала таков, что его амплитуда обратно пропорциональна амплитудно-частотной характеристике затухания сиг-

6.6. Интермодуляция и выравнивание амплитуд

нала в кабеле. Поскольку затухание в кабеле на высоких частотах больше, чем на низких, то на высоких частотах уровень сигнала делается выше, чем на низких частотах. Тем самым созданный наклон компенсирует затухание в кабеле, и в нужной точке системы получаем равномерный спектр сигнала, в котором сигналы всех каналов на разных частотах имеют примерно одинаковые уровни. Поскольку эквалайзер, установленный на входе (Экв1) на рис. 6.6, выравнивает уровни всех поступающих в усилитель сигналы до одинаковых значений, то через обе ступени усиления сигналы проходят без наклона амплитуд (равномерный спектр). После выходной ступени усилителя установлен предварительный эквалайзер (Экв2), функция которого заключается в создании предварительного наклона спектра перед его поступлением в коаксиальный кабель. Однако, существует гораздо более технически выгодный способ создания такого наклона, поэтому метод, показанный на рис. 6.6, обычно на практике не используется.

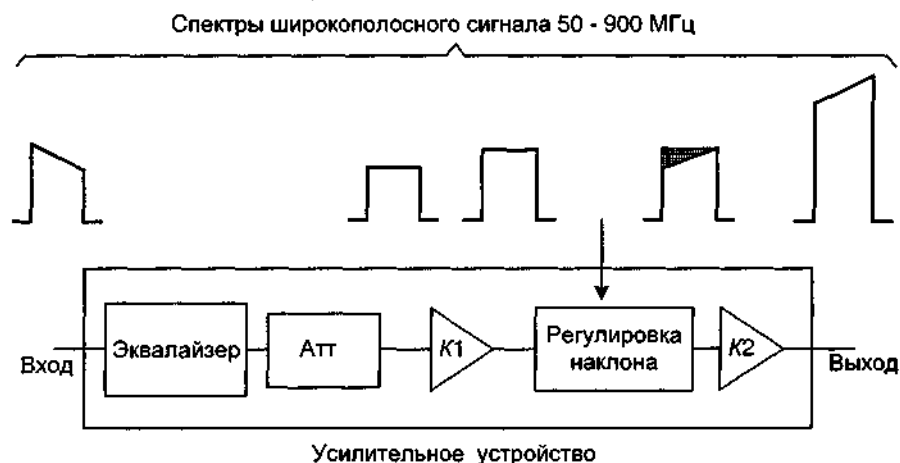


Рис. 6.7. Выравнивание между усилительными ступенями

Другой вариант создания наклона показан на рис. 6.7. Наклон в спектре сигналов создается с помощью устройства, называемого межкаскадным эквалайзером. Суть этого способа состоит в том, что создавая наклон спектра передаваемых сигналов в промежутке между входной и выходной ступенями усилителя (с помощью устройства регулировки наклона), не получаем нежелательных эффектов в виде ухудшения показателя C/N или снижения требуемого усиления в выходной ступени. В то же время, наклон перед выходной ступенью значительно снижает количество РЧ энергии, проходящей через выходную ступень, что существенно улучшит интермодуляционные характеристики всего устройства.

Изменение характера наклона можно проследить по частотным характеристикам спектра передачи для каждой точки внутри усилительного устройства на рис. 6.7. Заштрихованная область промежуточной частотной характеристики обозначает ту долю РЧ энергии, которая не проходит через выходную ступень усилителя. Эта область соответствует диапазону наклона характеристики, который является регулируемым. Данная методика, или ее варианты, используются очень широко в современных системах КТВ.

Резюме

Основными факторами, которые разработчик системы обязан учитывать при расчете нелинейных искажений, являются канальная нагрузка (количество передаваемых каналов) и количество активных устройств в системе. Зная эти параметры системы, а также выходные характеристики усилителя, которые определяются спецификацией производителя данного оборудования, разработчик рассчитывает показатели нелинейных искажений системы. Способы представления данных в спецификациях разных производителей могут различаться, но независимо от этого спецификация всегда содержит необходимую информацию. К нелинейным искажениям относятся интермодуляционные и кроссмодуляционные искажения. Так как канальная нагрузка почти всегда определена заранее, а выходные характеристики остаются неизменными (как только сделан выбор конкретного усилительного оборудования), то единственным фактором, которым может манипулировать разработчик кабельной сети, остается выходной рабочий уровень сигнала.

Показатели CTB и CSO являются одними из самых важных характеристик кабельных сетей и показывают, на сколько уровень полезного сигнала больше чем уровень составных помех комбинационных частот. На экране телевизора помеха комбинационных частот третьего порядка (оценивается показателем CTB) выглядит как хаотичное изменение яркости строк (муар) и плавное движение белых вертикальных и горизонтальных полос, представляющих собой синхрои импульсы мешающего канала. Эта помеха появляется в сетях с большой канальной нагрузкой, но если число ТВ каналов не велико (менее 15), то скорее будет заметна перекрестная помеха (кроссмодуляция, CXM), которая проявляется в виде плывущего изображение другого канала на фоне основного изображения. Составная помеха второго порядка (показатель CSO) выглядит как мелкоструктурный муар и менее заметна в силу того, что ее частота довольно далеко отстоит от несущей полезного изображения. Кроме того, накопление CXM и CTB в каскаде активных устройств осуществляется по закону второй степени, т.е. быстрее, чем CSO, которое накапливается по закону первой степени. Внешние источники помех нельзя путать с причиной возникновения CTB и CSO. Муар или точечные помехи на экране можно увидеть и в том случае, когда на каком-то участке сети понизился уровень радиосигнала одного или нескольких ТВ каналов и уровень внешней наведенной помехи стал более высоким по отношению к уровню полезного сигнала. Такое возможно вследствие перепадов температуры или неисправностей широкополосного усилительного оборудования. Если понизился уровень одного канала, то одновременно с внешней помехой на этом канале может наблюдаться интермодуляционная помеха, объясняемая влиянием более сильных сигналов других каналов. Ситуация с падением уровня одного ТВ канала вероятнее всего говорит о неисправности канального оборудования головной станции.

Расчеты результирующих показателей системы, включающей однотипные блоки, выполняется методом комбинирования с помощью логарифмических диаграмм. Расчеты результирующих показателей системы, включающей любое количество различных блоков, выполняется аналитическим методом.

ПАССИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для создания полноценной распределительной кабельной структуры, а также для корректировки коэффициента передачи (характеристики “усиление-потери”) в кабельной сети применяется множество пассивных устройств на различных участках. Пассивные устройства различаются как по своему назначению, так и по техническому исполнению. Существуют пассивные устройства с одинаковыми функциями для электрических (коаксиальных) и оптических сетей. В этой главе рассматривается назначение пассивных устройств, используемые в них конструктивные решения, и технические характеристики.

7.1. Требования к пассивному оборудованию кабельных систем

Для создания коаксиальной кабельной системы передачи требуется множество разнообразных приборов, с помощью которых к главному кабелю подключаются второстепенные кабельные маршруты (ответвления) и абонентские фидеры. Эти приборы в противоположность активным усилительным приборам называются пассивными приборами, поскольку они не обеспечивают усиления сигнала и не потребляют энергии для выполнения своих функций, а, наоборот, вносят потери в передаваемый сигнал.

Особенностью всех пассивных приборов, электрических или оптических, является то, что, проходя через них, сигнал претерпевает потери своей мощности. Мощность сигнала на выходе пассивного прибора уменьшается на определенную величину, в зависимости от функции данного прибора. Кроме функциональных потерь, нормированных спецификацией прибора, он имеет также побочные внутренние потери, связанные с обычным затуханием сигнала на высоких частотах в коаксиальных системах и с оптическими эффектами в оптических системах. Номинал пассивных приборов удобно оценивать величиной потерь мощности входного сигнала в децибелах.

Пассивные приборы можно классифицировать по принадлежности к следующим категориям:

- распределители (делители);
- ответвители;
- сумматоры;
- аттенюаторы;
- корректоры АЧХ (эквалайзеры);
- фильтры.

Согласно ГОСТ Р52023-2003 распределитель – это элемент линейной сети, обеспечивающий равное деление энергии радиосигнала (оптического сигнала) на несколько направлений; ответвитель – это элемент линейной сети, обеспечивающий ответвление части энергии радиосигнала (оптического сигнала) на одно или несколько направлений; корректор наклона АЧХ (эквалайзер) – это элемент

Глава 7. Пассивное оборудование

линейной сети, обеспечивающий компенсацию наклона амплитудно-частотной характеристики линейной сети в полосе частот каналов распределения; сумматор – это элемент кабельной распределительной сети, обеспечивающий сложение энергии радиосигналов (оптических сигналов) на общей нагрузке.

На первый взгляд, выбор пассивных элементов того или другого типа не представляет сложности, но это далеко не так. Наиболее важных показателей пассивных элементов сети является линейность их АЧХ в полосе передачи и величина возвратных потерь. Это обусловлено тем, что при строительстве сети в условиях крупных городов количество пассивных элементов после выхода последнего усилителя составляет в среднем от 6 до 12. Если пассивные элементы имеют плохую линейность АЧХ, необходимо будет проводить расчет сетей на разных частотах полосы, что приведет к удорожанию проектных работ.

Сформулируем основные требования к пассивным устройствам коаксиальных систем передачи.

- Полоса рабочих частот должна составлять не менее определенной стандартом полосы 5 – 1000 МГц. Во всей полосе неравномерность АЧХ потерь сигнала должна быть не более 1 дБ.

- Возвратные потери на входах и выходах приборов должны быть не ниже 18 – 20 дБ, что соответствует значению коэффициента стоячей волны SWR около 1,3 (подробнее об этом см. в гл. 8).

- Пассивные приборы должны быть способны пропускать ток для питания активных приборов, расположенных после них по сети.

- Для многопортовых устройств разность между ослаблением на разных портах должна быть не более 1,5 дБ, а переходное ослабление между разными портами (развязка) должно составлять не менее 22 – 25 дБ.

- Пассивные приборы должны быть способны пропускать сигнал прямого и обратного каналов.

Двумя основными качественными показателями пассивных приборов являются возвратные потери и развязка. Развязкой или взаимной изоляцией называется переходное затухание сигнала между выходами прибора или абонентскими отводами на любой частоте в рабочем диапазоне частот. Развязка очень важна, поскольку определяет степень взаимного влияния гетеродинов телевизоров на антенные входы друг друга. Возвратные потери характеризуют долю отраженной от входа прибора энергии (подробно об этом см. в гл. 8).

Для создания полнофункциональной распределительной коаксиальной структуры необходима обширная номенклатура изделий с разным количеством выходных портов и различными значениями ослабления на выходных портах. В настоящее время выпускается ряд ответвителей с 1, 2, 4 и 8 выходными портами и ряд делителей на 2, 3, 4, 6 и 8 выходных портов. Схемотехника большинства коаксиальных пассивных приборов такова, что они одинаково работоспособны и выполняют свои функции при передаче через них радиосигнала в любом направлении. Коаксиальному кабелю, очевидно, также безразлично, в каком направлении по нему распространяется сигнал. Пассивная часть системы, таким образом, является по своей структуре двунаправленной, поэтому задача построения двунаправленных коаксиальных систем решается только в зависимости от того, какое активное оборудование установлено в системе – однонаправленное или двунаправленное.

Оборудованию оптических систем передачи посвящена отдельная часть стандарта EN-50083(6), где говорится, что этот стандарт распространяется на все оптические передатчики, приемники, усилители, сплиттеры, направленные

7.1. Требования к пассивному оборудованию кабельных систем

ответвители, изоляторы, мультиплексеры, соединители и сплайсы, используемые в кабельных сетях. Требования к оптическим приборам вытекают из особенностей распространения света в оптическом материале и таких свойств света как отражение, рассеяние, рефракция, дифракция и дисперсия. Для оптических приборов, также как и для электрических, измеряют мощность сигнала на входных и выходных портах, используя оптический измеритель мощности, а на основании результатов этих измерений рассчитывают другие показатели. На измерении оптической мощности базируются измерения следующих параметров: оптический коэффициент возвратных потерь; затухание сигнала в волокне, соединителях, мультиплексерах и оптических изоляторах; усиление оптических усилителей; направленность оптических ответвителей и делителей; развязка оптических изоляторов, мультиплексеров и оптических разветвителей; дисперсия в волокне. Погрешность измерения мощности может быть обусловлена, например, ненулевым током покоя (при отсутствии светового излучения).

Согласно EN-50083 в спецификации пассивных оптических приборов должны публиковаться следующие параметры.

Для оптических соединителей:

- полоса рабочих частот (должна соответствовать используемой в системе передачи длине волны);
- рабочий диапазон длин волн (нм);
- минимальный коэффициент возвратных потерь оптического оборудования, являющийся отношением падающей оптической мощности к отраженной оптической мощности, по всему диапазону длин волн должен превышать 50 дБ (для делителей, ответвителей и мультиплексеров метод измерения может быть найден в EN181000);
- тип волокна и волоконного соединения;
- максимальные и средние потери (дБ);
- средняя наработка на отказ (MTBF).

Для оптических мультиплексеров, делителей, ответвителей и изоляторов:

- конфигурация портов;
- полоса рабочих частот (должна соответствовать используемой в системе передачи длине волны);
- рабочий диапазон длин волн (нм);
- максимальные потери (дБ);
- поляризационная стабильность;
- направленность (дБ);
- переходное затухание (дБ);
- минимальный коэффициент возвратных потерь (не должен превышать 40 дБ);
- тип волокна и волоконного соединения;
- средняя наработка на отказ (MTBF).

7.2. Пассивные приборы коаксиальных систем

Распределители (делители)

Распределителем называется прибор, который делит входящую РЧ энергию поровну между несколькими выходами. Распределители также называют делителями или разветвителями. В зарубежной литературе делитель называют сплиттером (splitter). Делители применяются, например, на участке домашней

Глава 7. Пассивное оборудование

сети, где сигнал делится между несколькими коаксиальными абонентскими ответвлениями. Если половина мощности направляется на каждый выходной порт делителя, то уровень сигнала, поступающего на каждый выходной порт, теоретически будет на 3 дБ ниже, чем уровень сигнала на входе. Но и сам делитель имеет внутренние потери, поэтому обычное затухание делителя определяется величиной 3,5 дБ или более для каждого из двух выходных портов. Каскадное включение нескольких делителей на 2 позволяет получить делители с любым числом выходов.

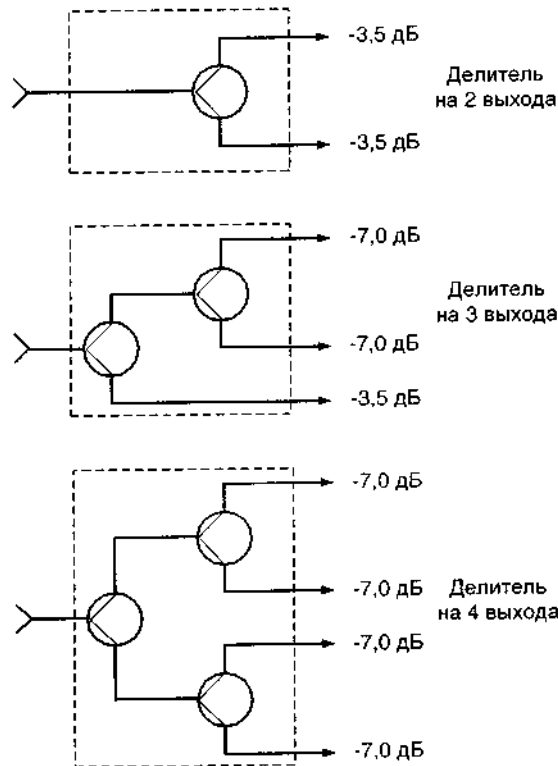


Рис. 7.1. Делители

Потери передачи зависят от целого количества “делений на два” энергии входящего сигнала. Возможно деление сигнала и на нечетное число выходов – в этом случае энергия сигнала распределяется между выходами делителя не поровну. Например, делитель с тремя выходами имеет на одном выходе затухание 3,5 дБ, а на двух других по 7 дБ. На рис. 7.1 показаны приборы с двумя, тремя и четырьмя выходами. Поскольку на выходе потери вычитаются из входного уровня сигнала, величина потерь показана со знаком “минус”. Делитель не имеет свойств направленности по какому-либо выходному порту, но между его выходными портами существует высокое переходное затухание РЧ сигнала. Делители могут устанавливаться в ветви домовой сети для обслуживания нескольких квартир или в квартирах абонентов для подключения нескольких телевизионных приемников или для организации нескольких равноправных магистральных направлений передачи. Делитель также может использоваться для

7.2. Пассивные приборы коаксиальных систем

объединения сигналов от нескольких РЧ источников на одном выходе путем его обратного включения, т.е. в качестве сумматора, что часто и делается в оконечных устройствах систем КТВ или на головных станциях.

Для делителя определяются следующие параметры:

- количество выходов;
- полоса пропускания (МГц);
- потери на выходах (дБ);
- возвратные потери (дБ);
- развязка между выходами (дБ);
- пропускаемый переменный ток (А).

Ответвители

Ответвителем называется распределительный прибор, который делит входящую РЧ энергию на неравные части между несколькими выходами. Ответвитель в отличие от делителя, имеет свойство направленности, так как энергия сигнала делится между выходами прибора в определенной пропорции. По этой причине ответвители иногда называют также направленными ответвителями. В зарубежной литературе ответвитель называют тэпом (tap). Кроме неравного деления сигнала еще одно отличие ответвителя от делителя заключается в наличии у ответвителя основного (проходного) выхода. Ответвители предназначены для случая, когда часть энергии РЧ сигнала должна быть отведена от основного направления передачи во второстепенный или фидерный кабель, например, из магистрального коаксиального кабеля в домовые сети. Существуют ответвители для ответвления сигнала в два, четыре, восемь и более кабельных отводов (не считая проходной выход). Соответственно этому их называют "ответвитель на 2", "ответвитель на 4" и так далее. Ответвители проектируются таким образом, чтобы обеспечить высокую развязку между его выходами. Это обеспечивает минимизацию нежелательных взаимных влияний между абонентскими оконечными приборами, подключенными к одному и тому же ответвителю.

Из-за высокой развязки между выходами, которую создают ответвители, их иногда применяют на головных станциях для объединения сигналов с выходов нескольких блоков оборудования путем обратного включения. Ответвители используются также и внутри усилительных устройств, например, в мостовом усилителе для ответвления части энергии радиосигнала из магистрали, для ответвления сигнала в тестовых точках усилителя, а также в устройствах АРУ и АРН.

Конструкцию ответвителя в общем случае можно рассматривать как комбинацию направленного ответвителя с одним отводом и одного или нескольких делителей. На рис. 7.2 изображена структура простейшего направленного ответвителя и ответвителя на 4. Основная часть радиочастотной энергии, поданной на вход этого прибора, пройдет через него и окажется на главном (проходном) выходе. На ответвительные выходы также попадет часть этой энергии, а ее количество будет определяться ослаблением сигнала в этих направлениях. Характеристиками ответвителя являются вносимые потери на проход в основном кабеле, потери на ответвлении в отводе кабеля, развязка между выходами. Каждая из этих величин измеряется в децибелах (дБ). Очевидно, чем больше энергии ответвляется, тем меньше энергии проходит на основной выходной порт. Со стороны основного выходного порта ответвитель будет создавать высокое ослабление для любых сигналов, поступающих на ответвитель-

Глава 7. Пассивное оборудование

ный порт. Это и означает, что прибор обеспечивает хорошую развязку между основным и ответвительным портами. Энергия сигнала, отраженного от ответвительного выхода (из-за несовпадения импедансов или из-за другой нерегулярности в системе), возвращается на входной порт, ослабленная на величину номинального затухания ответвителя. Однако отраженная РЧ энергия, которая возвращается на выходной порт прибора будет ослаблена на гораздо большую величину, чем номинал затухания ответвителя.

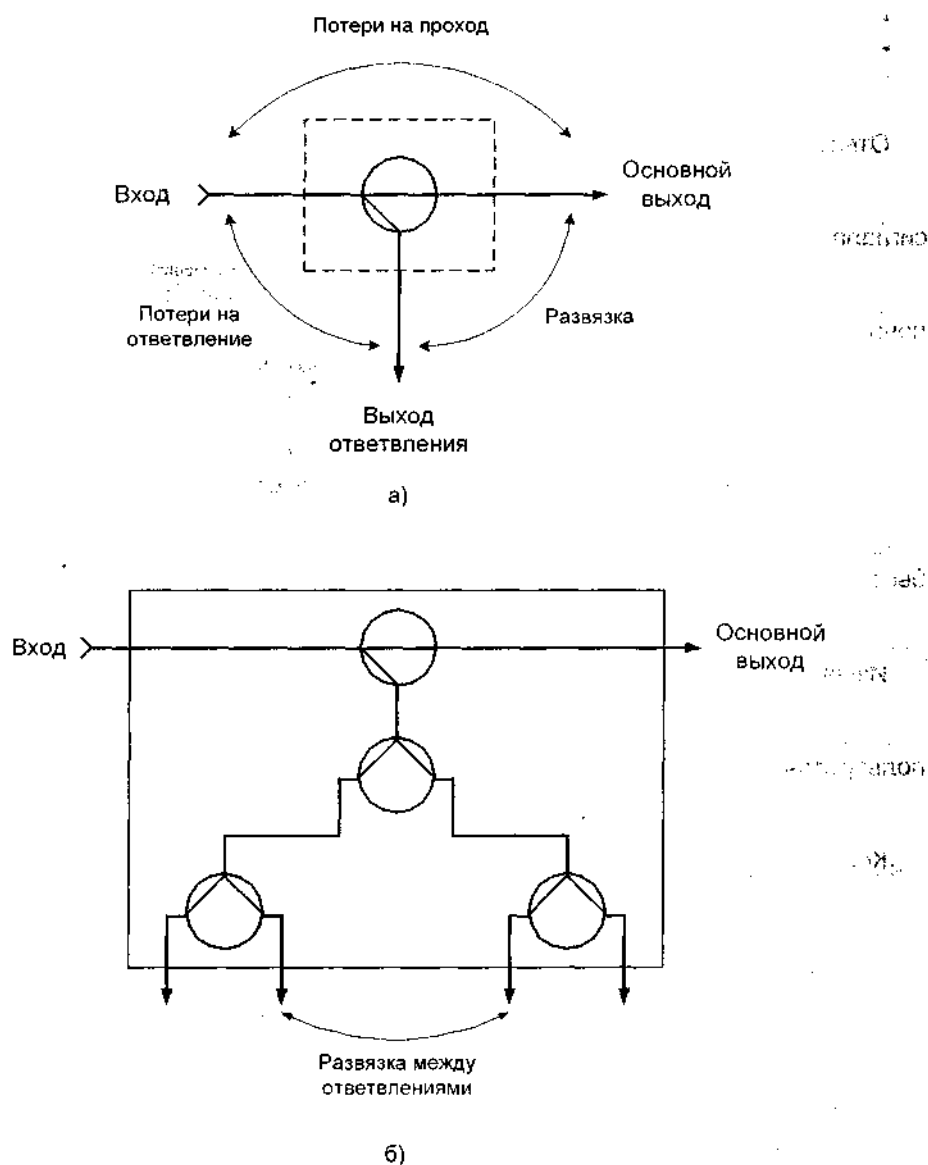


Рис. 7.2. Ответвители:

а – простейший направленный ответвитель; б – ответвитель на 4 выхода

7.2. Пассивные приборы коаксиальных систем

Пассивный прибор, включаемый в окончании коаксиального кабельного участка, должен обеспечивать адекватную нагрузку (75 Ом) для согласования кабельной линии по возвратным потерям. Некоторые приборы, специально предназначенные для окончаний кабельной линии, имеют такую нагрузку в своем составе и называются оконечными. Существенно, что если обычный (неоконечный) ответвитель или делитель установлен в окончании кабельного участка, то в соответствующий проходной порт этого прибора должна быть установлена заглушка (терминатор) для минимизации отражения РЧ энергии из-за несоответствия импедансов в линии. Устанавливать заглушки нужно и на выходы обычных делителей и ответвителей, если эти выходы в данный момент не используются. Если же выход прибора используется, т.е. к нему подключено какое-то устройство или другая кабельная линия, то за согласование отвечает подключенное устройство. В табл. 7.1 представлены номинальные значения потерь некоторых ответвителей. Ответвители, помеченные буквой Т (2Т, 4Т) являются оконечными (терминальными). Они используются исключительно на тех ответвлениях кабеля, где не планируется дальнейшее расширение системы.

Таблица 7.1

ан. 6м-20. 01

Параметры ответвителей

Число выходных портов (отводов)	Потери на проход, дБ	Потери на ответвлении, дБ	Развязка, дБ
1	1,7	7	22
1	1,1	10	25
1	0,8	13	28
1	0,6	16	31
1	0,4	20	35
2Т	–	4	–
2	2,8	8	23
2	1,5	11	26
2	1,0	14	29
2	0,7	17	32
2	0,6	20	35
2	0,4	23	38
2	0,4	26	41
2	0,4	29	44
2	0,4	32	47
4Т	–	7	–
4	2,8	11	26
4	1,7	14	29
4	1,0	17	32
4	0,7	20	35
4	0,6	23	38

Глава 7. Пассивное оборудование

Число выходных портов (отводов)	Потери на проход, дБ	Потери на ответвлении, дБ	Развязка, дБ
4	0,4	26	41
4	0,4	29	44
4	0,4	32	47

Ответвлять сигнал требуется в различных точках системы, где уровни могут сильно различаться. В то же время задача разработчика распределительной сети состоит в том, чтобы с помощью делителей и ответвителей подавать сигнал примерно одного и того же уровня на все ответвления, независимо от того, в какой точке системы они располагаются. С этой целью производится широкая линейка пассивных приборов с разными номиналами. Выбор ответвителя с определенным номиналом делается на этапе проектирования магистрального или домового участка и должен учитывать допустимый уровень сигнала в абонентском ответвлении, длины кабельных ответвлений, а также уровень сигнала в основном кабеле в точке подключения ответвителя. Например, если при разработке системы определено, что уровень сигнала должен составлять +10 дБ·мВ на входах всех абонентских ответвлений, а уровень сигнала в точке размещения ответвителя равен +33 дБ·мВ, то необходимо использовать ответвитель с номиналом потерь на ответвлении 23 дБ. Это обеспечит уровень +10 дБ·мВ на каждом выходном порте ответвителя с учетом внутренних вносимых потерь ответвителя около 0,4 дБ если это ответвитель на два и 0,6 дБ если это ответвитель на четыре.

Спецификация ответвителя включает следующие параметры:

- количество выходов;
- полоса пропускания (МГц);
- вносимые проходные потери (дБ);
- потери на ответвлении (дБ);
- возвратные потери (дБ);
- развязка между выходами (дБ);
- пропускаемый переменный ток (А).

Хотя в этой главе рассматриваются только пассивные устройства, нужно сказать несколько слов об активных ответвителях. Эти ответвители потребляют электроэнергию и применяются в системе в том случае, если необходимо выполнять какую-либо обработку передаваемых РЧ сигналов внутри самого ответвителя. Смысл таких устройств состоит в переносе части функций терминального оборудования из абонентского устройства в ответвитель. Конструкция таких ответвителей гораздо более сложна и требует, кроме отдельного блока питания, множества функциональных блоков. Обычными функциями активных ответвителей являются преобразование частоты и дескремблирование сигнала. К активным ответвителям адресного типа может напрямую обращаться головная станция, чтобы дистанционно включать и отключать абонента. Используются такие устройства довольно редко.

Поскольку энергия для питания усилителей должна проходить почти через всю систему вместе с РЧ сигналами, пассивные распределительные приборы снабжаются отдельной цепью, пропускающей ток питания (частоты 50 Гц) независимо от РЧ сигналов.

7.2. Пассивные приборы коаксиальных систем

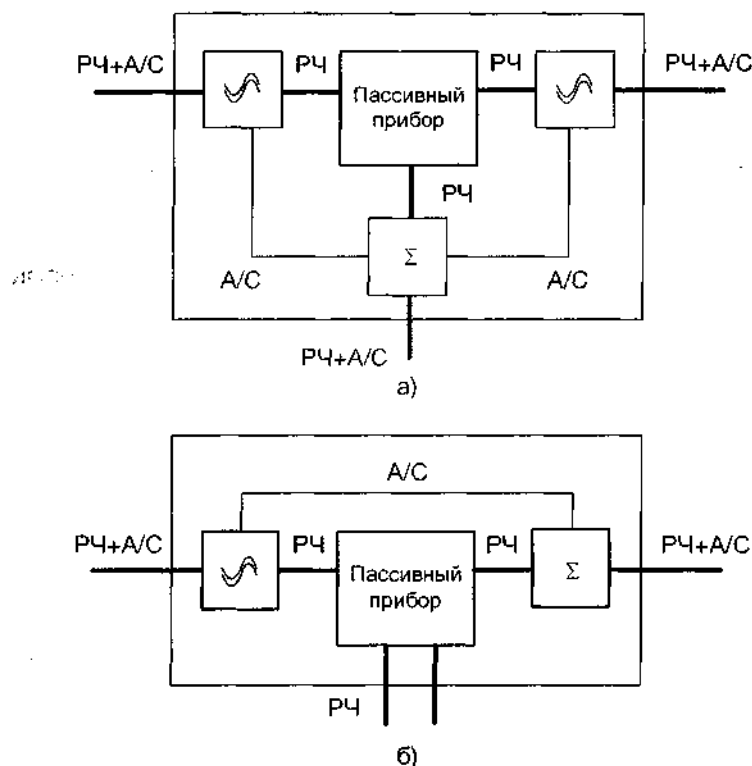


Рис. 7.3. Прохождение тока питания через пассивный прибор

Таким образом ответвители и делители, предназначенные для установки в магистрали, пропускают ток для подачи питания на следующие за ним магистральные усилители системы. Энергия питания может пройти со входа на любой из выходов и обратно без влияния на характеристики передачи данного устройства. Это свойство называется изоляцией по цепи питания. Прохождение энергии питания через пассивный прибор иллюстрирует рис. 7.3. Поскольку ток питания отфильтровывается от радиочастотного сигнала, а затем снова складывается с ним на нужном выходе, любой выход прибора можно исключить из использования без влияния на РЧ передачу. На рис. 7.3, а изображен делитель, а рис. 7.3, б – ответвитель. Энергия питания не требуется только на участке домашней сети за последним домашним усилителем, поэтому абонентские делители и ответвители, устанавливаемые в домашней сети и тем более в помещениях абонентов, не должны пропускать ток питания и не содержат этой цепи.

Мультисвитчеры

Способы распределения сигнала между множеством конечных пользователей не ограничиваются применением делителей и ответвителей. Распределительные устройства, называемые мультисвитчерами (multiswitch) предназначены для построения каскадируемой широкополосной сети эфирного и спутникового ТВ. Мультисвитчеры применяются в основном для создания небольших сетей коллективного пользования (масштаба одного здания), но также мо-

Глава 7. Пассивное оборудование

гут встраиваться в имеющуюся кабельную сеть, получая сигналы от головной станции большой сети КТВ. Они могут использоваться и в индивидуальной приемной телевизионной системе в качестве головного модуля, т.е. быть частью абонентского оборудования. В зависимости от уровня входного сигнала и числа абонентских точек в доме могут применяться как пассивные, так и активные мультисвитчеры. Мультисвитчеры допускают каскадное включение и создание довольно большой (более 80 абонентских точек) параллельной или последовательной распределительной структуры с шинной или звездообразной топологией.

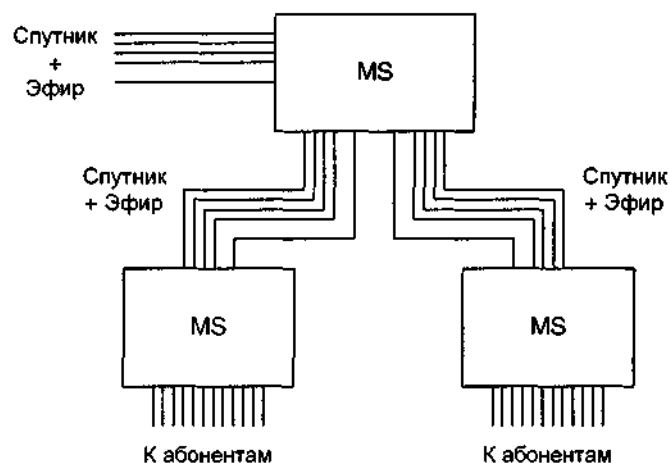


Рис. 7.4. Каскадно-параллельное включение мультисвитчеров

Принцип действия мультисвитчеров тот же, что у обычных ответвителей. Они также характеризуются диапазоном частот, потерями на проход, развязкой между выходами, но кроме этого числом выходов. Преимущество построения небольшой сети коллективного пользования масштаба здания, которая получает сигнал от спутниковой тарелки и эфирной телевизионной антенны, с помощью мультисвитчеров сети заключается в том, что каждый абонент получает каналы эфирного ТВ (47 – 862 МГц) и каналы спутникового ТВ (950 – 2150 МГц) обеих поляризации по одному кабелю. В сети КТВ большого масштаба мультисвитчеры упрощают организацию разветвленной распределительной структуры в домах. Недостаток мультисвитчеров в том, что распределительная вертикаль содержит большое число кабелей. Примером являются мультисвитчеры серии TMS фирмы TRIAX. На рис. 7.4 представлен вариант включения мультисвитчеров.

Аттенюаторы и эквалайзеры

Аттенюаторы предназначены для намеренного ослабления сигнала, когда в некоторой точке сети требуется получить сигнал более низкого уровня, например, перед абонентским устройством, входной уровень которого оказался выше нормативного. Эквалайзер используется для коррекции частотных искажений, вносимых разными элементами системы, в частности, для компенсации наклона амплитудно-частотной характеристики усилителя или частотной неравно-

мерности потерь в коаксиальном кабеле. Двухнаправленные фильтры делят спектр системы передачи на участки таким образом, что один участок (например, ВЧ) используется для передачи в прямом направлении, а другой участок (например, НЧ) используется для передачи в обратном направлении.

Существуют и другие, вспомогательные, пассивные приборы, используемые в кабельных коаксиальных системах. Например терминаторами или заглушками называются приборы, с помощью которых создается корректное завершение кабельной сети или неиспользуемых портов приборов с тем, чтобы согласовать импеданс оконечной точки системы с волновым сопротивлением кабеля, составляющим 75 Ом. Установка заглушки позволяет не создавать в оконечностях системы точек несовпадения импедансов и минимизировать тем самым отражение РЧ энергии в кабеле или эффект эха. Терминаторы обычно помещаются на свободные выходные разъемы ответвителя, к которым не подключен ни один абонентский кабельный отвод. Множество приборов такого типа используется в сочетании с усилительным блоком в структуре усилителя. Например, составными частями усилителей являются аттенюаторы, эквалайзеры и двухнаправленные фильтры.

7.3. Компоненты оптического оборудования

Хотя оптические приборы и компоненты практически не используются в настоящее время при построении сетей кабельного телевидения, им нужно уделить некоторое внимание как возможной перспективе. Как и при создании распределительной коаксиальной сети, оптические приборы могут использоваться для создания разветвленной распределительной структуры, способной обслуживать множество абонентских точек. По устройству оптические приборы отличаются от приборов коаксиальных сетей, но обладают теми же функциями и имеют то же назначение, а именно – деление, ответвление и фильтрация сигналов. Эти приборы предназначены для включения в оптическом звене системы передачи между двумя точками, в которых расположены устройства электрооптического и оптоэлектрического преобразования сигнала, т.е. между оптическими передатчиками (генераторами) и приемниками (детекторами).

Принцип действия оптических приборов базируется на законах оптики и свойствах света, рассматриваемых в гл. 9, посвященной передаче сигнала с помощью света. Свет является электромагнитной волной, распространяющейся в волноводе подобно ОВЧ излучению в металлическом коаксиальном кабеле, но очень высокая частота этой волны обуславливает несколько иное ее поведение, поэтому, многие ограничения и требования, связанные с электромагнитными волнами диапазона ОВЧ, не имеют отношения к световым волнам. Вследствие этого оптическая система передачи оказывается практически свободной от всех проблем, возникающих в коаксиальных системах. Например, в высокочастотной коаксиальной системе важнейшим условием эффективной передачи энергии и минимизации отраженной энергии являлось равенство импедансов кабеля и прибора в точке их соединения, в том числе и для случая, когда к выходу кабеля подключен не прибор, а терминатор (заглушка). Теоретически то же самое требование применимо и к оптической передаче, но практически в нем необходимости, поскольку хотя отражение света от окончания волокна и происходит, амплитуда и задержка отраженной волны таковы, что никакого заметного влияния на передачу это не оказывает, и меры защиты от отражений оказываются ненужными.

С другой стороны, в оптических системах возникают другие, специфичные именно для них, проблемы и ограничения. Так, соединение окончаний двух оптических кабелей, выполняемое с помощью специального разъема (сплайс-разъема) представляет собой гораздо более серьезную проблему, чем соединение двух отрезков коаксиального металлического кабеля. В оптических разъемах возникают сложные нерегулярности, неизбежно создающие сильное отражение и вызывающие потери. В сплайсе возникает задача чисто механического характера, включающая точное совмещение двух торцов, совпадение размеров сердцевин, эксцентриситет сердцевин. Только при соблюдении этих условий возможна минимизация отраженной световой энергии и максимальная передача света в нужном направлении. Конструкция и геометрические параметры оптического прибора оказывают значительное влияние на его технические характеристики. В структуру оптического прибора обычно входит несколько связанных между собой оптических компонентов, переходы сигнала между которыми неизбежно ухудшают качество передачи. Например, при использовании в приборе зеркал, призм или дифракционных решеток возникают промежуточные переходы стекло-воздух и воздух-стекло, каждый из которых вносит потери из-за френелевского отражения.

Компонентами оптических приборов являются линзы, зеркала, призмы, фильтры, дифракционные решетки. Линзы и зеркала (плоские, эллиптические, параболические) являются наиболее распространенными оптическими компонентами. Посредством линз и зеркал свет фокусируется и направляется нужным образом. Призма, как известно, обладает свойством избирательно преломлять световые лучи в зависимости от длины волны падающего света, поэтому она в частности применяется для выделения света разных длин волн из широкополосного светового луча. Систему из нескольких призм можно использовать в качестве оптического коммутатора, который путем взаимного механического перемещения торцов волокон или призм селективно направляет свет в определенное волокно. Дихроический фильтр представляет собой поверхность из материала, имеющего свойство отражать свет одной длины волны и пропускать свет другой длины волны при облучении поверхности светом обеих длин волн. Дифракционная решетка состоит из нескольких параллельных канавок или насечек на оптическом материале, сделанных, как правило, травлением. Если расстояние между насечками сравнимо с длиной световой волны, то решетка будет под некоторым углом преломлять свет определенной длины волны и прозрачно пропускать свет всех других длин волн. Из перечисленных компонентов состоят практически все оптические приборы.

На рис. 7.5 показано как с помощью двух пассивных оптических приборов – мультиплексора и демультиплексора выполняется соответственно объединение и разделение оптических сигналов разных частот. В структуру этого прибора входит стеклянный стержень, по существу представляющий собой отрезок градиентного волокна с оптическими свойствами линзы, и частично отражающая поверхность, являющаяся дихроическим зеркалом. Геометрические параметры этого прибора таковы, что отраженные лучи фокусируются в точке расположения входа волокна. Световой луч, входящий в стеклянный стержень в любой точке, кроме его оси, отражается в обратном направлении к оси стержня. Таким образом, прибор позволяет мультиплексировать оптические сигналы, поступающие по разным входным волокнам и производить обратное преобразование, подавая сложный мультиплексированный сигнал в обратном направлении на выход прибора.

7.3. Компоненты оптического оборудования

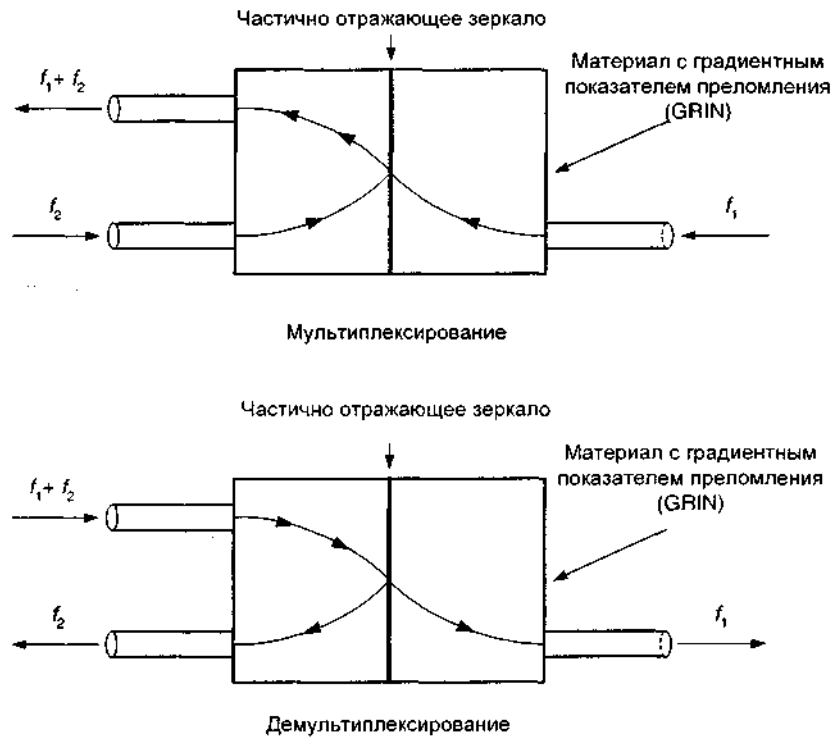


Рис. 7.5. Системы мультиплексирования и демultipлексирования

Такие оптические приборы, как ответвители и делители, можно создать, не применяя описанные выше оптические компоненты и механизмы – только с помощью оптического волокна. Методика изготовления этих простейших приборов состоит в скручивании волокон, сужения области скрутки и сплавления в единую структуру. Такие приборы называются биконическими или сплавленными.

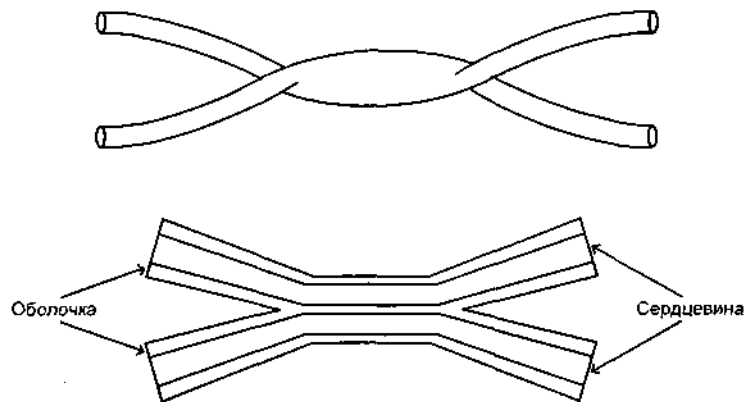


Рис. 7.6. Биконический ответвитель

Глава 7. Пассивное оборудование

На рис. 7.6 показан биконический прибор с четырьмя портами. Заметим, что в месте соединения двух волокон сплавлены только их оболочки, так что сердцевины волокон остаются разделенными одной общей оболочкой. Свет, попадающий в этот общий участок оболочки, может распределяться между двумя сердцевинами и перетекать из одной сердцевины в другую. Класс биконических приборов включает как двухточечные, так и многоточечные (звездообразные) разветвители и ответвители. Свет может вводиться посредством такого устройства из одного волокна сразу в несколько или наоборот, из нескольких волокон в одно.

Другой вариант структуры ответвителя – структура с отражающим зеркалом. На рис. 7.7 показан многопортовый ответвитель, в котором световой луч, введенный через любой порт отразится определенным образом от зеркала и попадет на выход одного из двух других портов. Разумеется, при этом имеют значение геометрические параметры прибора.

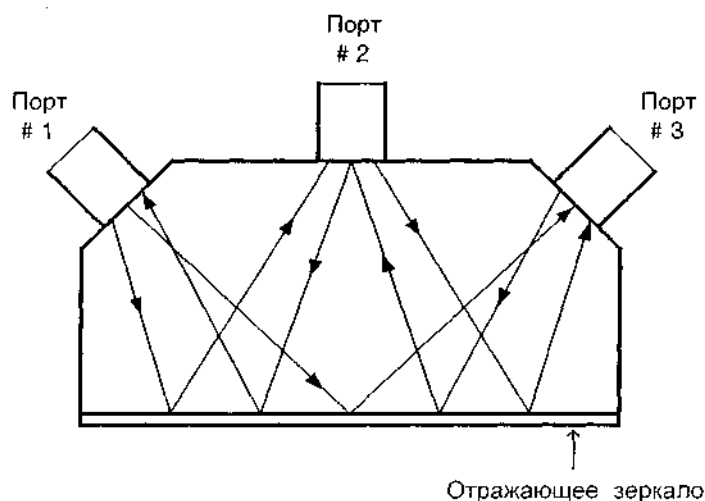


Рис. 7.7. Многопортовый ответвитель

Оптические ответвители могут быть двунаправленными, что обеспечивает возможность создания интерактивной системы с обратным каналом. Структура пассивного однонаправленного оптического ответвителя показана на рис. 7.8. Чтобы реализовать функцию ответвителя, у которого потери на ответвление нормированы, нужно получить нормированное количество световой энергии, отраженной от зазора, а остальная часть света должна пройти через ответвитель напрямую. Для этого в процессе производства толщина наплавленной пленки из специального состава или просто воздушного промежутка (зазора) в стекле волокна может делаться такой, чтобы определенное необходимое количество световой энергии попало на выходной порт ответвления.

Существуют и активные оптические ответвители, в которых выполняется промежуточное преобразование оптического сигнала в электрический. Оптический сигнал из оптического магистрального волокна детектируется и конвертируется в электрический сигнал, подаваемый затем в коаксиальные абонентские ответвления. Такое устройство показано на рис. 7.9.

7.3. Компоненты оптического оборудования

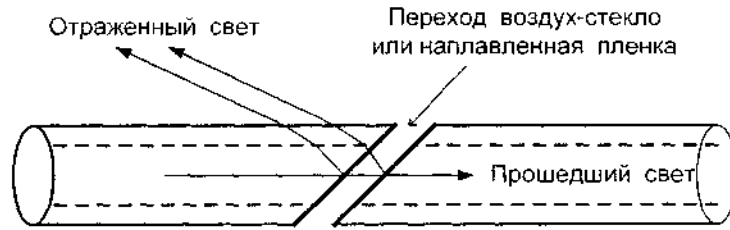


Рис. 7.8. Пассивный оптический ответвитель

В коаксиальных системах кабельного телевидения ответвители используются повсеместно. В оптических системах ответвители используются гораздо реже, поскольку оптическая технология, как правило, пока не находит практического применения при построении распределительной структуры, в которой необходимы сервисные ответвления. Ответвители включаются в оптический кабель путем сращивания или с помощью сплайсов, и каждое такое соединение вносит свои искажения, снижает надежность и длительность эксплуатации системы.

Есть и другая причина редкого использования ответвителей на оптических участках. Дело в том, что в волоконно-оптическом кабеле используются довольно низкие уровни световых сигналов, поэтому многократное ответвление сигнала, необходимое для создания распределительной системы приведет к большим потерям и сокращению расстояния передачи. Из этой ситуации можно выйти с помощью активных оптических ответвителей, детектирующих и преобразующих оптический сигнал в электрический в каждой точке включения сервисного ответвления, но это потребует большого количества таких устройств и увеличения общей стоимости системы. Кроме того, в случае использования активных ответвителей потребуется подавать питание на каждый из них, а это приведет к еще большему росту сложности и стоимости системы. Заметим, что на выходах абонентских ответвлений оптический сигнал в любом случае необходимо детектировать и преобразовывать в электрический для подключения к входу телевизионного приемника.

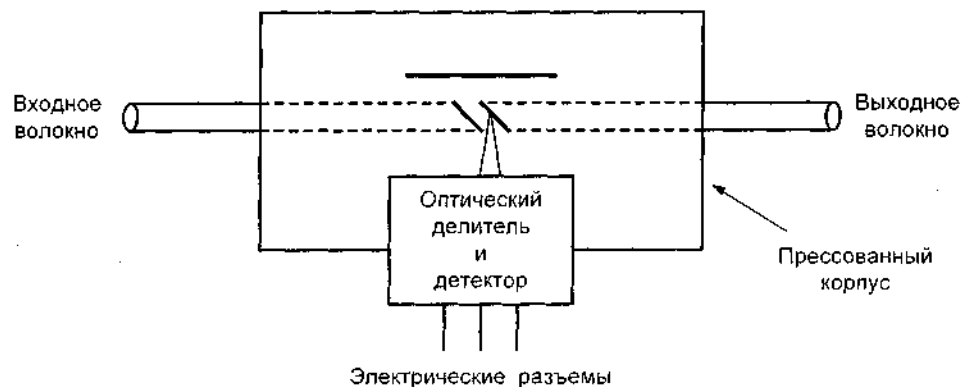


Рис. 7.9. Активный оптический ответвитель

Резюме

В настоящее время широкое распространение получают гибридные системы, в которых оптический кабель используется на транспортных и магистральных линиях передачи внутри всей обслуживаемой области, а на так называемых участках последней мили, оканчивающихся точками подключения абонентских терминалов, используется радиочастотный коаксиальный кабель. В интерфейсных точках перехода от оптического кабеля и коаксиальному не выполняется никаких операций модуляции или демодуляции сигналов, а происходит только детектирование оптического сигнала и преобразование его в электрический для возможности последующей передачи по коаксиальной структуре. Магистральная сеть может быть частично или полностью построена на оптическом кабеле, а домовая сеть практически всегда строится на основе коаксиального кабеля, следовательно, распределительные пассивные приборы широко используются на магистральном и домовом уровнях сети. На транспортных участках, которые почти всегда выполняются на основе оптики, ответвления просто не требуются, поэтому вопрос выбора пассивных устройств касается, в основном, коаксиальной части системы. Если все-таки в оптической линии планируется установить некоторое количество ответвителей, то выполнить расчет номиналов и оценить эффективность использования этих приборов можно по той же методике, что применяется для коаксиальной сети. При выборе ответвителя или делителя должен быть известен уровень отводимого сигнала, потери на отводе или делении и требуемый уровень на выходе (выходах) ответвлений.

J 5H

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ И КОМПОНЕНТЫ

Рассмотрим основное средство передачи сигнала в системах КТВ – коаксиальный кабель. Коаксиальные кабели используются в настоящее время на магистральных и домовых участках сети и в соответствии с этим относятся к нескольким типам, которые характеризуются разными размерами, различными качественными показателями и имеют разную стоимость. При проектировании коаксиальной кабельной структуры необходимо принимать во внимание конструкционные параметры кабелей, стоимость прокладки, пригодность кабеля для конкретных условий строительства, возможность реконструкции или расширения кабельной сети. Любое серьезное обсуждение вопроса об использовании коаксиальных кабелей должно учитывать современное состояние технологии их производства и их стоимость. Оба эти фактора подвержены изменению, поэтому от разработчика требуется хорошее знание рынка телекоммуникационного оборудования и умение ориентироваться в выборе предлагаемого производителем кабеля. Эта глава не содержит справочных сведений по коаксиальным кабелям, так как задача обзора всех существующих марок кабеля является непосильной и выходит за рамки обсуждаемых вопросов. Здесь содержится классификация кабелей, описание их механических и электрических характеристик и некоторые рекомендации по выбору кабеля.

Далее в этой главе рассматривается эффективность передачи сигнала по коаксиальному кабелю с точки зрения отражений. Отраженный сигнал возникает в любой кабельной системе и распространяется в направлении, обратном направлению передачи полезного сигнала, являясь, таким образом, помехой. Задачей разработчика является минимизация отраженного сигнала. Будут рассмотрены причины возникновения отражений, показатели, которыми характеризуются отражения, и меры, позволяющие минимизировать отражения.

8.1. Структура коаксиального кабеля

Коаксиальный кабель в сетях кабельного телевидения выполняет роль закрытой среды передачи и является, очевидно, пассивным элементом. Внутренняя структура коаксиального кабеля определяет его механические и электрические свойства. Под внутренней структурой понимаются конструкционные особенности кабеля (например, способ выполнения экрана и оплетки, наличие или отсутствие несущего троса) и материалы, применяемые при его изготовлении (тип проводника и диэлектрического материала). Классическая структура коаксиального кабеля образована двумя металлическими проводниками с общей воображаемой осью. Понятие “коаксиальный” означает, что внешний проводник имеет вид замкнутого цилиндра, по центральной геометрической оси которого проходит внутренний проводник, который, в свою очередь отделен от внешнего слоем диэлектрического (непроводящего) материала. Внешний проводник од-

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

новременно с передачей сигнала может исполнять роль экрана, защищая всю структуру от влияния внешних электромагнитных излучений.

Простейший коаксиальный кабель представляет собой цилиндрическую алюминиевую трубку, окружающую центральный проводник и промежуточный диэлектрик (рис. 8.1). Внутренний проводник изготавливается из меди, имеющей низкое сопротивление. Снаружи вся структура покрыта изолирующей оболочкой, выполненной из высокомолекулярного полимера – поливинилхлорида (PVC) – для защиты от вредных механических и химических воздействий.

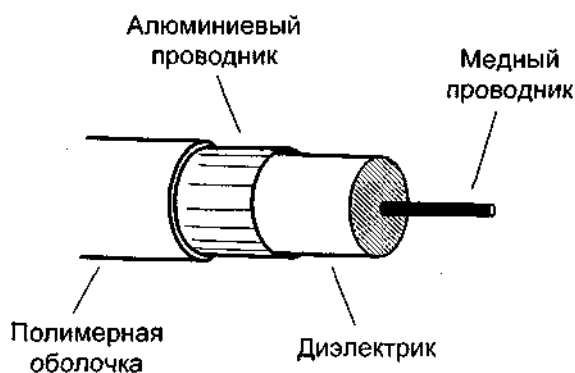


Рис. 8.1. Простейший коаксиальный кабель

В принципе любой коаксиальный кабель имеет подобную структуру и является модификацией этой минимальной простейшей конструкции. На ее основе создано множество разнообразных марок кабеля, предназначенных для различных целей и условий строительства. Главным образом различия заключаются в используемых материалах и технологиях производства. Например, в кабелях первого поколения в качестве материала центрального проводника использовалась только медь. Позднее по экономическим соображениям стали использовать опаянный медью алюминиевый или стальной центральный провод вместо сплошного медного (опайка проводника также называется плакированием). Сопротивление плакированного медью алюминиевого проводника выше, чем сопротивление сплошного медного, поэтому потери в таком кабеле несколько возрастают.

Наружным проводником и одновременно экраном служит алюминиевая труба. Она может быть изготовлена методом электросварки тонкой алюминиевой жести или методом волочения алюминиевой трубы. Технология сварки является простой и дешевой, но может вызывать появление локальных неоднородностей трубы и образование очагов коррозии в местах сварочных швов, а получающийся таким образом тонкостенный алюминий легко подвергается деформации.

Технология волочения позволяет изготовить цельнотянутую толстостенную трубу без швов, что исключает вышечисленные недостатки сварки, обеспечивает существенно лучшее экранирование и устойчивость к внешним деформациям, в частности, вдвое большую максимально допустимую силу натяжения. Благодаря этому прокладка кабеля с бесшовной трубой не требует особой осторожности.

8.1. Структура коаксиального кабеля

Диэлектрические материалы кабелей могут варьироваться от твердого полимера до обычного воздуха. Твердый диэлектрический материал обеспечивает более надежную и длительную механическую поддержку местоположения центрального проводника и наилучшую водонепроницаемость кабеля. В кабелях с воздухом в качестве диэлектрического материала постоянное положение центрального проводника поддерживается с помощью дисков из термопластика, периодически размещенных вдоль всего отрезка кабеля (структура типа "бамбук"). Потери в кабеле с воздушным диэлектриком минимальны. Однако, кабель с твердым диэлектриком сегодня редко используется в системах КТВ из-за высоких потерь передачи и плохой гибкости, а кабель с воздушным диэлектриком также редко используется из-за низкой защиты от деформации и невозможности изгиба под острыми углами при прокладке. Гибкость кабеля характеризуется допустимым радиусом изгиба. Чем сильнее изгиб кабеля, тем будет острее угол изгиба и меньше радиус изгиба. Допустимым радиусом изгиба называется такой радиус изгиба кабеля, при уменьшении которого (т.е. более сильном изгибе) образуется передавливание или излом кабеля. При передавливании или изломе внутренняя структура проводников в этом месте деформируется, что приводит к образованию зон неоднородности, т.е. к ухудшению возвратных потерь в кабеле. Поскольку внешняя оболочка кабеля через некоторое время после передавливания восстанавливается, существует опасность, что это останется незамеченным, и поврежденный кабель будет использован при прокладке линии. Обнаружить такой дефект потом будет достаточно сложно.

Промежуточным вариантом изготовления диэлектрика является пенистый полимер (полиэтилен или полиэстер), наполненный инертным газом (обычно азотом) или воздухом. Кабель с пенистым диэлектриком наилучшим образом сохраняет геометрию сечения, поддерживая постоянное расстояние между экраном и внутренним проводником даже при сгибах под острым углом. Сперва для получения пенистой структуры применяли химические реакции, но многолетний опыт эксплуатации показал, что химически вспененный диэлектрик не гарантирует долговременной стабильности электрических параметров кабеля. Поэтому стали применять физически вспененный полимер, получаемый путем впрыскивания газа в твердый полимер под высоким давлением, что дает равномерное заполнение всего материала микроскопическими пузырьками газа. Кабель с физически вспененным диэлектриком обеспечивает снижение потерь и в то же время высокую механическую защиту, гибкость кабеля и длительную стабильность его параметров. Потери в такой структуре снижаются почти на 15% по сравнению со структурой с химически вспененным диэлектриком и почти на 40% по сравнению со структурой с твердым диэлектриком. Кроме этого, равномерность заполнения диэлектрика газом создает барьер для проникновения влаги, обеспечивая почти полную водонепроницаемость кабеля, что очень существенно, поскольку вода, проникая внутрь кабеля, может вызывать замыкание высокочастотной цепи прохождения сигнала или цепи питания линии или просто ухудшить электрические параметры кабеля (в частности, увеличить затухание). В случае повреждения оболочки и экрана проникновению воды внутрь кабеля будет препятствовать пенистый полимер, который плотно заполняет его внутреннее пространство.

Конструкция с цельнотянутым внешним алюминиевым проводником, стальным (плакированным медью) внутренним проводником и физически вспенен-

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

ным диэлектриком является сейчас типовой и реализована в большинстве марок кабеля. Применение тонкого алюминия и вспененного полимера гарантирует уменьшение веса кабеля, что немаловажно при его транспортировке, монтаже и прокладке (особенно воздушной). Более сложные структуры могут содержать дополнительные конструктивные элементы, роль которых, впрочем, уже не относится к основной функции кабеля. Например, в структуру кабеля добавляется специальный экран, выполненный в виде стальной проволочной оплетки. Это позволяет сделать алюминиевую трубку более тонкой или просто заменить ее алюминиевой фольгой. Помимо прочего стальной плетеный экран армирует, т.е. придает большую прочность и в то же время гибкость всей структуре. Следующим уровнем сложности является та же конструкция с добавлением под наружную оболочку пластичного гелеобразного компаунда (например, полиизобутилена), который обеспечивает защиту кабеля при механическом износе (стирании), разрыве или пробое внешней полимерной оболочки. Полужидкий материал компаунда, заполняя места повреждений оболочки кабеля, обеспечивает самоуплотнение кабеля и предотвращает коррозию наружного проводника, а также обеспечивает дополнительную изоляцию в местах установки разъемов.

Для предотвращения сдвигов центрального проводника, наружного проводника, диэлектрика и оболочки друг относительно друга все перечисленные компоненты скрепляются (склеиваются) между собой слоями водоотталкивающего материала. Это необходимо в особенности для поддержания стабильности параметров кабеля в тяжелых климатических условиях со значительными суточными и сезонными колебаниями температуры, поскольку все компоненты кабеля имеют различные температурные коэффициенты сжатия (например, объем полиэтилена меняется в 6 раз сильнее, чем объем алюминия). Если скрепления нет, то постоянные взаимные смещения компонентов будут приводить к преждевременному старению кабеля и ухудшению его параметров. Скрепление слоев также улучшает герметичность всей структуры.

Существуют коаксиальные кабели с собственным, интегрированным в структуру кабеля тросом, который также называется несущим тросом. Несущий трос используется при прокладке подвесных (воздушных) кабельных линий для поддержки веса кабеля и для уменьшения его растяжения при провисании на опорах воздушной кабельной линии. Чрезмерное растяжение кабеля опасно тем, что оно приводит к отклонению его механических, а, следовательно, и электрических характеристик от нормативных значений. Для устранения чрезмерного растяжения кабель объединяется с тросом в цельную механическую структуру. В качестве троса обычно используется оцинкованный стальной провод, сплошной либо скрученный, впрессованный во внешнюю полимерную оболочку. Стальной трос должен обеспечивать прочность, необходимую для его расчетного натяжения, поэтому материал троса подвергается специальному тестированию на прочность.

При расчете натяжения троса необходимо учитывать не только его собственный вес и вес кабеля, но и возможность налипания снега и льда в зимний период, а также силу действия ветра. Встроенный трос позволяет обойтись без дополнительных креплений кабеля и параллельного протягивания внешнего несущего троса. Применение такого кабеля позволяет упростить воздушную прокладку линий, снизить стоимость строительства сети и повысить стабильность параметров кабеля.

8.1. Структура коаксиального кабеля

Таким образом, коаксиальный кабель должен иметь приемлемую гибкость (определяемую допустимым радиусом изгиба), высокую механическую защиту и прочность, хорошую гидроизоляцию и стабильность параметров, достигаемую применением физически вспененного диэлектрика и промежуточным склеиванием компонентов.

Готовый кабель может упаковываться в специальные кабель-боксы, которые представляют собой пластиковые контейнеры с вращающимся барабаном внутри, или в бухты (shrink-pack) по 100 или 250 м. Это упрощает транспортировку кабеля и его последующую размотку в местах прокладки.

8.2. Типы коаксиальных кабелей

Выбор типа кабеля для конкретного проекта сети основывается на оценке преимуществ от его использования с точки зрения всех его качественных характеристик. Перечислим те критерии, которыми должен руководствоваться разработчик кабельной сети при выборе кабеля:

- механические характеристики;
- электрические характеристики;
- стабильность параметров;
- стоимость.

Механические характеристики кабеля связаны с его структурой, конструктивными особенностями и определяют такие важнейшие его качества как гибкость, прочность и долговечность. Электрические характеристики также зависят от механической структуры кабеля и материалов, использованных при его изготовлении, и определяют качество передачи сигнала в системе. К электрическим характеристикам относится множество параметров, среди которых сопротивление проводников кабеля, затухание сигнала в кабеле, степень экранирования и другие.

Механические и электрические характеристики составляют технические характеристики кабеля. Немаловажное значение для выбора кабеля имеет и его стоимость. Стоимость строительства сети из качественного кабеля будет выше, но обычно увеличение стоимости строительства оправдано и даже необходимо для того, чтобы затраты на последующую в процессе эксплуатации замену поврежденных участков проводки не оказались слишком высоки и обременительны. Повреждение кабеля может быть как чисто механическим, возникшим вследствие неправильного обращения с ним (разрыв, изгиб, деформация), так и появившимся вследствие естественного старения и ухудшения характеристик (под действием климатических условий). В том и другом случае потребуется замена кабеля, поэтому затраты на строительство следует соизмерять с возможными будущими затратами на ремонт и техническое обслуживание сети. Более дорогие кабели обычно имеют более высокую прочность и длительную стабильность параметров, хотя это не является гарантированным правилом. Техническое обслуживание является серьезнейшей статьей расхода для оператора сети. Согласно статистическим данным на абонентских отводах производится около 70 % ремонтных работ в кабельных сетях. В целом выбор кабеля делается на основе компромисса между его стоимостью и техническими характеристиками. Найти оптимальное соотношение того и другого при соблюдении требований технического задания является целью разработчика.

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

Технические характеристики кабелей должны соответствовать общепринятым стандартам. Существует несколько стандартов качества кабельной продукции. Стандарт ISO 9001 устанавливает нормы на все технические характеристики кабеля. Кроме этого, кабели должны быть протестированы на соответствие экологическим стандартам, таким как европейские стандарты пожаробезопасности IEC 332-1, IEC 332-3 и IEC 754-1, определяющим огнестойкость кабеля, нормы выделения дыма и токсичных газов при возгорании. Фирма-производитель в процессе производства должна тщательно тестировать кабель на соответствие всем этим стандартам. Среди наиболее известных фирм, специализирующихся на изготовлении кабельной продукции можно назвать Cavel, Commscope, Belden, TFC. Разнообразие марок кабеля очень велико и каждый производитель имеет собственную систему обозначений выпускаемых серий кабеля (CATV 11, RG-6, SAT 703, 27/115 FC, PK75-9-12, TX 840 и многие другие).

Совокупность механических и электрических характеристик относит данный кабель к какому-либо типу. Тип кабеля не устанавливает строго фиксированные значения его механических и электрических характеристик, но предполагает, что они находятся в допустимых, соответствующих данному типу границах. Кабель одного и того же типа от разных производителей может иметь несколько различающиеся характеристики. Тип кабеля, как правило, однозначно определяет только его размер, который зависит от диаметра внешнего проводника. Размер кабеля измеряется по наружному диаметру внешнего проводника без защитных кожухов и армирующих элементов. Тип кабеля характеризует в целом его назначение или рекомендуемую область применения, т.е. показывает, для какого иерархического уровня системы он предназначен – транспортного, магистрального, домового или абонентского. В соответствии с этим коаксиальные кабели можно классифицировать по следующим типам:

- магистральные (транковые);
- распределительные (домовые);
- абонентские.

Магистральный кабель играет важнейшую роль в передаче сигнала на большие расстояния. Само название говорит, что кабель этого типа используется для строительства участков магистральной линии. Магистральный кабель должен обладать улучшенными техническими характеристиками. Конструкция магистрального кабеля должна обеспечивать практически полную гидроизоляцию, что особенно важно при прокладке подземных магистралей. Эти качества должны совмещаться с высокой механической прочностью и защищенностью от повреждений. Существует множество марок магистрального кабеля с различными обозначениями. Наиболее удобна стандартная номенклатура кабелей, в которой номер серии соответствует размеру (диаметру внешнего проводника) кабеля в дюймах от 0,412 до 1 дюйма. Заметим, что полный размер кабеля будет несколько больше, так как он измеряется по диаметру внешней оболочки. Например, кабель серии 500 имеет внешний проводник диаметра 0,5 дюйма (около 1,27 см), а диаметр его оболочки составляет 0,56 дюйма (около 1,42 см). Для магистральных кабелей действует следующее правило: чем выше номер серии, тем больше размер кабеля и, следовательно, тем меньше потери в нем. Наиболее часто используются серии 500, 565, 625, 750. Кабели большего размера применяются редко. В табл. 8.1 приведены данные по магистральным кабелям нескольких серий американской фирмы TFC. Кроме размера и веса серии могут различаться типом диэлектрика и наличием дополнительных

8.2. Типы коаксиальных кабелей

конструктивных элементов – различных экранов, защитных покрытий и несущих тросов для прокладки подвесных магистралей. При этом гибкость кабеля ухудшается, но как раз этот параметр не слишком важен для магистральных кабелей, так как магистральная линия обычно строится по прямой или, во всяком случае, без сильных изгибов. Для магистрального кабеля гораздо более существенны надежность и стабильность электрических характеристик, гарантирующая высокое качество передачи.

Таблица 8.1

Параметры магистральных кабелей фирмы TFC

Серия	Диаметр оболочки, дюйм	Масса, кг/м
412J	0,470	0,110
500J	0,560	0,146
TX565	0,625	0,158
625J	0,685	0,217
750J	0,820	0,307
875J	0,945	0,396
1000J	1,080	0,561
TX1160	1,250	0,640

Ранее для создания транспортных линий передачи также применялся толстый коаксиальный кабель диаметром более 1 дюйма. В настоящее время на транспортном уровне коаксиальный кабель уже практически не применяется, а вместо него используется оптическое волокно с гораздо лучшими показателями скорости передачи, качества передачи и экономичности. Низкие потери в оптическом волокне позволяют отказаться от усилителей в транспортных линиях и еще более повысить тем самым качество передачи. Однако, система небольшого масштаба может и вовсе не иметь транспортного уровня. На других уровнях – магистральном уровне и уровне домовых и абонентских ответвлений – коаксиальные кабели по-прежнему широко применяются, и будут применяться, вероятно, еще довольно долго.

Среди электрических характеристик наиболее существенными являются низкие потери передачи на высоких частотах, высокая степень экранирования и хорошая электропроводимость по току питания. Если требуется повысить коэффициент экранирования, применяется трехкратное (tri-shield) или четырехкратное (quad-shield) экранирование в виде дополнительных металлических оплеток. Пример магистрального кабеля приведен на рис. 8.2. Здесь показана структура магистрального кабеля для подземной прокладки, в которой применен специальный силиконовый компаунд, предотвращающий коррозию при повреждении внешней изоляции. Кабель для прокладки подвесных линий может иметь вспененный диэлектрик или, реже, воздушный, а в случае прокладки в грунт, где кабель более подвержен проникновению влаги, применяется вспененный диэлектрик. Кабели с твердым диэлектриком не применяются на магистралях из-за высоких потерь передачи. В настоящее время кабели ячеистой структуры “бамбук” с воздухом в качестве диэлектрика практически полностью

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

вытеснены кабелем с вспененным диэлектриком. Большую популярность получили магистральные кабели с цельнотянутым внешним алюминиевым проводником и алюминиевым, плакированным медью, центральным проводником. Отметим, однако, что ведущие операторы крупных систем кабельного телевидения в Европе все-таки чаще используют на магистрали более качественные медные кабели, несмотря на их высокую стоимость. Для России такой выбор также актуален в связи со сложными климатическими условиями.

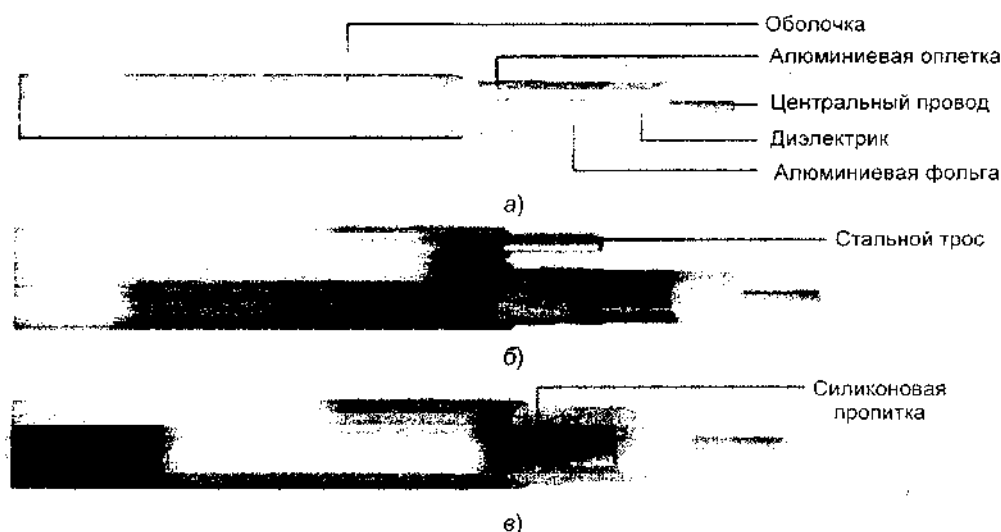


Рис. 8.2. Типы коаксиальных кабелей:
а – кабель RG-6; б – кабель RG-11 с тросом; в – магистральный кабель серии 540

Распределительные кабели применяются для создания магистральных ответвлений, через которые сигнал подается от магистрали на домовые распределительные сети, а также кабели разводки внутри домовой распределительной сети по стояковым ветвям. Магистральные ответвления обычно строятся на основе коаксиального кабеля серии RG-11, в домовые распределительные сети строятся на основе коаксиального кабеля серии RG-6 или RG-11. имеют разные качественные показатели и конструктивные особенности. Серия кабеля строго не определяет, на каком участке распределительной сети он должен использоваться. Разработчик сам делает этот выбор исходя из стоимости строительства. Кабели каждой серии лишь рекомендуются как наиболее подходящие для строительства того или иного участка сети. Распределительные кабели должны иметь хорошую гибкость для возможности прокладки внутри зданий, а также высокую стабильность параметров, в частности коэффициента экранирования. Учитывая, что для создания гибкой структуры кабеля, невозможно использовать жесткий внешний проводник здесь часто применяется лента из полистирола, покрытая с двух сторон алюминием. Такой проводник обеспечивает хорошую эластичность, но плохое экранирование, поэтому в качестве дополнительного экрана поверх проводника накладывают оплетку из стальной или алюминиевой проволоки. Как и в магистральных кабелях, для обеспечения низкого затухания сигнала диэлектрик изготавливается из физически вспененного полимера. На рис. 8.2 приведены примеры распределитель-

8.2. Типы коаксиальных кабелей

ных кабелей. Здесь показан кабель RG-6 с алюминиевым экраном, состоящим из комбинации алюминиевой фольги с оплеткой, и внешней оболочкой из PVC, а также кабель для прокладки подвесных ответвлений магистрали RG-11 с собственным несущим тросом, центральным алюминиевым проводником с медным покрытием и экраном из алюминиевой фольги с оплеткой, которую окружает PVC оболочка.

Абонентские кабели применяются для создания отводов от стояковых фидерных ветвей домовой сети, заканчивающихся терминальными точками в квартирах абонентов. Кабели абонентских отводов должны быть еще более гибкими, так как на этом уровне сети часто бывает необходимо обходить множество резких поворотов и углов помещений. По этой причине внешний проводник обычно выполняется в виде гибкой проволочной оплетки или тонкой металлической фольги. Для абонентских отводов, как правило, используется кабель серии RG-59. Кабель серии RG-6 может применяться на домовом и на абонентском уровне. Существуют также абонентские кабели для структурированных кабельных систем, которые совмещены с телефонными проводами, что значительно снижает стоимость монтажа при совместной проводке сети кабельного телевидения и телефонной сети. Для обеспечения высокого качества передачи в абонентских точках сети проектированию абонентского отвода следует уделять особое внимание. Например, нужно учитывать, что в обратном канале на абонентских отводах возникает от 70% до 90% шума, в зависимости от уровня электромагнитных помех в месте прокладки кабеля. Следовательно, на первый план здесь выходит коэффициент экранирования. Другой проблемой абонентских кабелей является ухудшение их электрических характеристик вследствие чрезмерного натяжения при монтаже. Для предотвращения этого явления внутренний проводник изготавливается из высокопрочного металлического провода, имеющего повышенную сопротивляемость к растяжению, который надежно скреплен со слоем диэлектрика.

На любом уровне сети можно использовать кабель более качественной серии (это зависит только от финансовых возможностей), но не наоборот. Например, категорически нельзя использовать кабель RG-59 для прокладки магистральных ответвлений, поскольку это сведет показатели качества обслуживания на недопустимо низкий уровень. Но, в то же время, никто не запрещает использовать кабель RG-6 для прокладки абонентских отводов, хотя это и нецелесообразно с точки зрения стоимости. Поскольку в финансовом отношении разработчик всегда находится в жестких рамках выделяемой на строительство суммы, его задача при выборе кабеля состоит в минимизации общей стоимости кабеля. При этом используется следующий подход. Сначала выбирается кабель той минимальной серии, которую можно использовать на данном участке сети, а если затем в ходе расчетов выясняется, что при использовании кабеля с такими характеристиками показатели сети неудовлетворительны, выбирается более дорогой кабель и расчет повторяется.

8.3. Электрические характеристики коаксиального кабеля

Коаксиальный кабель характеризуется следующими электрическими показателями:

- полоса частот (МГц);
- потери передачи в заданной полосе частот (дБ);

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

- волновое сопротивление (Ом);
- показатель возвратных потерь (дБ);
- сопротивление по постоянному току (Ом);
- коэффициент экранирования (дБ).

Эти характеристики приводятся в документации производителя или в рекламных проспектах. Существуют и другие, менее значимые для выбора кабеля характеристики, например, напряжение пробоя или передаваемая мощность, которые тоже приводятся в документации. Далее подробнее рассмотрим каждую из перечисленных характеристик, а также связанные с ними понятия.

Напомним, что важнейшим физическим явлением, характеризующим принцип работы коаксиального кабеля при передаче по нему высокочастотного сигнала, является поверхностный эффект (скин-эффект). Известно, что сопротивление металлического проводника зависит от его размеров. Если увеличить диаметр проводника, то область протекания электронов станет шире и сопротивление проводника по постоянному току уменьшится. То же самое справедливо и для переменного тока – проводник большего размера вносит меньшие потери в передаваемый сигнал – однако на разных частотах затухание по переменному току оказывается различным. Причиной этого и является скин-эффект, возникающий в металлическом проводнике. Суть его состоит в том, что в области, близкой к наружной поверхности проводника протекает больше электронов, чем в центре проводника. Чем выше частота сигнала, тем более выражен скин-эффект. На тех частотах, которые используются в системах КТВ, скин-эффект становится довольно ощутимым. Таким образом, скин-эффект объясняет зависимость затухания радиочастотного сигнала в кабеле от частоты. На высоких частотах во внешней приповерхностной области проводника протекает больше электронов, чем на низких частотах. В результате на высоких частотах в передачу вносятся большие потери, поскольку увеличение частоты влечет уменьшение (сужение) той области проводника, в которой распространяется поток электронов.

Полоса частот и потери передачи

Полоса частот, которую предоставляет кабель для передачи сигнала, напрямую связана с величиной затухания сигнала на разных частотах радиочастотного спектра, которая, в свою очередь зависит от качества используемых в кабеле материалов. Бессмысленно говорить о ширине полосы пропускания кабеля без указания соответствующей ей величины затухания. Речь здесь идет лишь о ширине полосы при допустимом затухании. В принципе коаксиальный кабель способен пропускать радиочастотный сигнал очень высоких частот и доступная для передачи полоса частот может быть очень широкой. По этой характеристике коаксиальный кабель уступает только волоконно-оптическому кабелю. Другие среды передачи (витая пара, радиоканал) имеют существенно худшие показатели затухание-полоса. Коаксиальные кабели нового поколения способны работать в частотном диапазоне до 2 ГГц. Этого вполне достаточно для создания сетей КТВ, имеющих стандартную полосу 5 – 1000 МГц.

Потери в коаксиальном кабеле происходят вследствие рассеяния энергии сигнала на металлических проводниках кабеля. Результат этого рассеяния выражается в том, что в процессе распространения по кабелю уровень сигнала падает. Потери в кабеле определяются разностью между уровнями сигнала на выходе и на входе кабеля:

$$\Delta S = S_{\text{вых}} - S_{\text{вх}}$$

Затухание (потери) сигнала в заданной полосе частот является основной исходной характеристикой на этапе проектирования магистрального усилительного участка и распределительной сети. Исходя из этого параметра и предполагаемой длины магистральной линии передачи, рассчитывается возможная протяженность усилительного участка и выбирается усиление усилителей, достаточное для компенсации потерь на этом участке. Потери задаются для определенной частоты, находящейся в пределах доступной полосы и для определенной длины кабеля (обычно на 100 м), поскольку затухание сигнала, кроме частоты зависит, очевидно, и от пройденного им по кабелю расстояния. Чем длиннее кабель, тем большая часть входной энергии рассеется в нем и тем ниже будет уровень выходного сигнала. Таким образом, любое значение потерь сигнала данного кабеля всегда задается относительно частоты передачи и длины отрезка кабеля. В спецификации обязательно указывается, при какой частоте и длине отрезка было измерено данное значение затухания. В магистральной сети к величине потерь предъявляются более высокие требования, чем в домовой сети.

На разных частотах затухание различно, и, чем выше частота, тем сильнее затухание. Экспериментально установлено, что зависимость коэффициента затухания от частоты f имеет нелинейный характер, причем затухание растет с ростом частоты в заданной полосе пропорционально квадратному корню из частоты:

$$L = a + bf + c\sqrt{f},$$

где a , b , c – коэффициенты ($c \gg a$, $c \gg b$), значения которых зависят от конкретной серии кабеля. Затухание в кабеле является функцией от диаметров проводников кабеля, физических свойств используемого металла и диэлектрического материала кабеля. Сплошной медный кабель имеет меньшие потери, чем алюминиевый или стальной. Кабель с твердым полимерным диэлектриком при тех же размерах имеет большее затухание. Для кабеля большего диаметра с тем же диэлектриком затухание сигнала будет ниже. Эти особенности марки кабеля и учитываются коэффициентами a , b , c в приведенной формуле. В результате для каждой марки кабеля вид зависимости потерь от частоты. Незменным будет только нелинейный характер зависимости.

Зависимость потерь в кабеле от его длины, очевидно, является линейной. Поэтому потери задаются как удельная величина, рассчитанная для определенной длины, обычно на 100 м.

В табл. 8.2 представлены значения потерь передачи в полосе частот 5-1750 МГц для кабеля разных типов (абонентский RG-59, распределительные RG-6 и RG-11, магистральный серии 540). Приведенные значения не являются стандартными, а только характеризуют кабель определенной марки и могут несколько отличаться у разных производителей.

Волновое сопротивление

Поскольку затухание в кабеле зависит от частоты, необходимо ввести некоторую характеристику, не зависящую от частоты, чтобы для расчета мощности передаваемого сигнала можно было использовать закон Ома.

Характеристики затухания кабеля разных типов

Частота, МГц	Затухание, дБ/100м			
	RG-59	RG-6	RG-11	QR-540
5	2,5	1,9	1,2	0,5
55	6,2	5,1	3,2	1,5
185	11,3	9,3	5,7	2,9
250	12,8	10,8	6,7	3,4
450	17,4	14,4	9,1	4,6
600	20,3	16,7	10,4	5,4
865	24,1	19,9	12,9	6,7
1000	26,6	21,5	14,2	7,1
1750	35,8	28,7	19,5	9,2

Такой характеристикой кабеля является его полное волновое сопротивление (импеданс). Любая металлическая линия передачи, будь то витая пара или коаксиальный кабель, характеризуется волновым сопротивлением. Волновое сопротивление коаксиального кабеля является функцией отношения диаметра внутреннего проводника к диаметру внешнего проводника и свойства используемого в кабеле диэлектрика. Основным показателем электромагнитных свойств любого диэлектрического материала – это его диэлектрическая постоянная. В коаксиальных кабелях могут использоваться разные диэлектрические материалы с разными значениями диэлектрической постоянной. Так, для воздуха диэлектрическая постоянная равна 1, для твердых полимерных материалов диэлектрическая постоянная находится в пределах от 2 до 2,5. Диэлектрическая постоянная полутвердых или вспененных полимеров, представляющих собой пористую структуру, заполненную воздухом или инертным газом, составляет около 1,5.

Волновое сопротивление имеет размерность резистивного сопротивления (Ом). Существует приблизительная эмпирическая формула для расчета импеданса Z коаксиального кабеля с некоторым диэлектриком:

$$Z = 138 \lg \frac{D/d}{\sqrt{k}},$$

где D – диаметр внешнего проводника; d – диаметр внутреннего проводника; k – диэлектрическая постоянная материала.

Эта формула показывает, что можно изготовить коаксиальный кабель любых размеров и независимо от этого импеданс будет одним и тем же, если все параметры кабеля меняются пропорционально и между ними сохраняется соответствующее постоянное соотношение. Например:

- 1) $D = 0,886$ см, $d = 0,254$ см, $k = 1,0$;
- 2) $D = 0,443$ см, $d = 0,127$ см, $k = 1,0$;
- 3) $D = 1,905$ см, $d = 0,444$ см, $k = 1,5$.

Хотя во всех трех случаях значения параметров кабеля различны, импеданс оказывается примерно равным 75 Ом.

8.3. Электрические характеристики коаксиального кабеля

Значение 75 Ом стандартизовано для систем кабельного телевидения. Чтобы понять, почему именно это значение выбрано как стандартное, нужно рассмотреть влияние импеданса на важнейшие качественные характеристики кабеля – потери сигнала на радиочастотах, эффективность передачи мощности по постоянному току и напряжение пробоя (каждый фактор учитывается при постоянстве двух остальных). Понятно, что потери должны быть минимальны, передаваемая мощность максимальна и напряжение пробоя также максимально. На рис. 8.3 показаны характерные зависимости всех трех факторов от величины импеданса коаксиального кабеля.

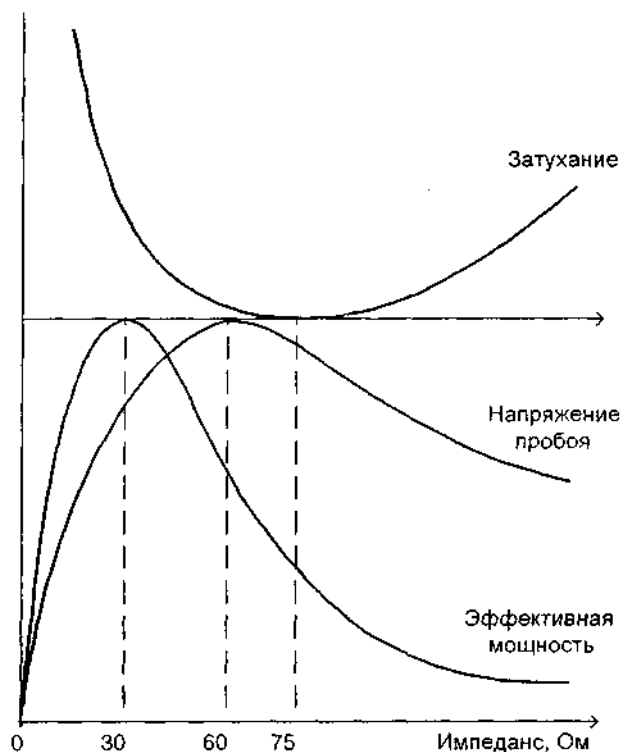


Рис. 8.3. Характеристики коаксиального кабеля

По рисунку видно, что каждая зависимость имеет свою точку оптимального импеданса. Оптимальный с точки зрения потерь передачи импеданс кабеля составляет около 76 Ом. Если же оценивать величину волнового сопротивления по критерию максимума напряжения пробоя, то оптимальным является значение 60 Ом. С точки зрения повышения эффективности передачи мощности сигнала более подойдет кабель с импедансом около 33 Ом. Обратите внимание, что на участке между 30 и 75 Ом зависимости затухания и мощности передачи имеют один характер. Это можно объяснить следующим образом. Уменьшая размер центрального проводника и оставляя неизменным размер внешнего проводника, увеличиваем импеданс кабеля и сопротивление центрального проводника, следовательно, для передачи по кабелю сигнала той же мощности потребуются меньший ток через проводник. С другой стороны,

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

уменьшая размер центрального проводника, сужаем область протекания потока электронов, т.е. уменьшаем область действия скин-эффекта, что в свою очередь ведет к увеличению потерь передачи на радиочастотах. Получается, что увеличивая импеданс, снижаем потери, но в то же время снижаем эффективность передачи сигнала. Стандартное значение было выбрано на основе компромисса между этими факторами. Поскольку в системах КТВ передаются сигналы с довольно низкими уровнями мощности, а протяженность коаксиальных кабельных линий часто очень велика, то более предпочтителен компромисс в пользу снижения потерь передачи на радиочастотах за счет уменьшения переносимой мощности.

Чтобы снизить потери при постоянном значении импеданса 75 Ом, можно просто увеличить диаметры и внешнего и внутреннего проводников, сохраняя их соотношение, однако, на изготовления кабеля большего размера расходуется больше материала и стоимость такого кабеля будет выше.

Показатель возвратных потерь

С величиной волнового сопротивления тесно связан другой параметр кабеля – показатель возвратных потерь (RL). Показатель возвратных потерь является для кабеля менее критичным параметром, чем другие. Далее, при рассмотрении отражений в кабельных системах, будет показано, что в нормальных условиях возвратные потери во внутренней структуре кабеле гораздо выше, чем для любого прибора. Это значит, что уровень отраженного сигнала (возвратной волны) очень мал и при расчетах его не учитывают. Существенные внутренние отражения в кабеле возникают на неоднородностях волнового сопротивления, которые образуются только за счет механических дефектов во внутренней структуре или при наличии повреждений вдоль отрезка кабеля. Напомним, что волновое сопротивление кабеля зависит от диаметров внутреннего и внешнего проводника и диэлектрической постоянной изолирующего материала. При изменении любого из этих параметров меняется и волновое сопротивление. Это может произойти во время производства, прокладки или эксплуатации кабеля. Однако, процесс производства тщательно контролируется добросовестным производителем, поэтому более вероятны две другие причины. Если при прокладке на кабеле образуется сильный перегиб или петля, то в структуре кабеля возникнет механическое напряжение и геометрия поперечного сечения кабеля меняется. Случайные повреждения в процессе эксплуатации кабеля происходят из-за неосторожного обращения, результатом которого может быть передавливание кабеля или повреждение его внешней оболочки. При сдавливании пенного материала меняется его диэлектрическая постоянная, а передавливание проводников может вызывать появление микротрещин и менять их электрические параметры. Такие изменения, как правило, трудно контролируемы и плохо поддаются измерению. Однократное случайное изменение импеданса в некоторой точке скорее всего не окажет никакого влияния на работу кабеля, но несколько наличие нескольких таких периодически расположенных точек может вызвать существенное суммарное отражение сигнала, превышающее допустимый уровень. Особенно это актуально для процесса прокладки, при котором зачастую интервалы между точками крепления кабеля подчинены периодичности городской инфраструктуры. Если отражения от нескольких нерегулярностей складываются друг с другом в фазе, то формирующееся отражение может вызывать очень серьезные потери сигнала.

8.3. Электрические характеристики коаксиального кабеля

Величина возвратных потерь в кабеле характеризуется параметром SRL (Structural Return Loss), который эквивалентен коэффициенту отражения и показывает степень подавления возвратной волны. Этот параметр определяется путем измерения величины отраженного сигнала в кабеле во всей полосе системы передачи с помощью генератора качающейся частоты (sweep-генератора). При выборе кабеля надо учитывать, что он должен иметь различную величину SRL для разных типов кабеля. Согласно стандарту EN-50083 для магистральных кабелей величина SRL должна быть не ниже 30 дБ (соответствует коэффициенту отражения не более 3%), а для распределительных и абонентских кабелей не хуже 20 дБ.

Сопротивление по постоянному току

Еще одной электрической характеристикой кабеля, не зависящей от частоты, является его сопротивление по постоянному току. Сопротивление по постоянному току обычно определяется отдельно для центрального проводника, внешнего проводника и полной цепи. Затухание сигнала в заданной полосе частот и сопротивление по постоянному току являются двумя наиболее важными и критичными характеристиками при проектировании системы питания кабельной сети наряду со значениями токов, потребляемых усилителями, и длинами кабельных участков. Сопротивление кабельной цепи является определяющим фактором для расчета напряжения, потребляемого всей сетевой структурой. Питание осуществляется по магистральному кабелю с помощью так называемых устройств вставки питания (инserterов питания). Эффективность передачи постоянного тока к потребляющим устройствам определяется сопротивлением кабельной цепи. Этот параметр особенно важен в системах с высоким уровнем потребления электроэнергии. В современных сетях наблюдается рост потребляемой мощности, связанный с использованием перестраиваемых модульных усилителей с более сложной структурой и подключением к сети интерфейсных устройств кабельной телефонии и передачи данных. Без сомнения эта тенденция сохранится и в будущем. Общее число источников питания в системе зависит от суммарного потребления энергии активными элементами и от сопротивления кабельного контура. Выбор кабеля с низким сопротивлением по постоянному току может привести к уменьшению необходимого числа источников питания. Кроме того, использование кабеля с низким сопротивлением позволяет снизить затраты на энергопотребление.

Коэффициент экранирования

Одной из важнейших характеристик коаксиальных кабелей, является коэффициент экранирования, называемый также screen-фактором. Он показывает степень защиты передаваемого сигнала от влияния внешних электромагнитных помех. Измеряется этот показатель также в децибелах, а определяется он как отношение уровня полезного сигнала к уровню помехи по мощности в некоторой точке кабеля. Величина коэффициента экранирования особенно важна, когда уровень сигналов эфирных передатчиков ТВ и радио, а также уровни бытовых электромагнитных помех очень высоки, что характерно для городских условий. К кабелям разных типов предъявляются разные требования по коэффициенту экранирования. Стандарт EN-50083 устанавливает, что этот параметр должен быть в любом случае не ниже 75 дБ в полосе частот прямого ка-

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

нала 30 – 1000 МГц. Для таких крупных городов как Санкт-Петербург и Москва экранирование распределительных кабелей должно составлять не менее 85 – 90 дБ, а экранирование абонентских кабелей не менее 80 дБ. Для магистральных кабелей экранирование должно составлять не менее 100 дБ. Считается, что в средних условиях кабель с показателем экранирования 100 дБ обеспечивает практически полную защиту передаваемого сигнала от внешних помех.

В настоящее время выпускаются кабели со стандартной (двойной), трехкратной и четырехкратной степенью экранирования. Стандартная экранирующая конструкция состоит из алюминиевой фольги, нанесенной на слой полипропилена и дополнительной алюминиевой оплетки. Фольга должна была быть герметичной для предотвращения попадания воды внутрь кабеля, поэтому она накладывается на полипропилен с допуском, гарантирующим сохранение герметичности при сгибах. Такая конструкция обеспечивает степень экранирования около 90 дБ. Кабели с трехкратным экранированием содержат конструкцию, включающую кроме стандартной комбинации фольги с оплеткой еще и наложенную поверх оплетки негерметичную фольгу, что увеличивает степень экранирования примерно до 105 дБ. Ввиду того, что трехкратная экранирующая конструкция становится более хрупкой и жесткой, она является эффективной при отсутствии сильных изгибов кабеля. То же самое относится и к четырехкратному экранированию. В структуре с четырехкратным экранированием добавлена еще одна внешняя оплетка. Такой экран обеспечивает максимальную степень экранирования, которая при отсутствии изгибов кабеля может достигать 120 дБ. Коэффициенты экранирования для разных степеней экранирования представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Экранирование кабеля

Степень экранирования	Коэффициент экранирования, дБ
Стандартное	85 – 90
Трехкратное	100 – 105
Четырехкратное	115 – 120

Та или иная степень экранирования выбирается в зависимости от уровня электромагнитных помех в месте прокладки сети. Кабель со стандартным экраном можно использовать при низком и среднем уровне электромагнитных помех, например в сельской местности или в небольшом городе. Кабель с трехкратным экраном рекомендуется для условий, где уровень электромагнитного шума выше среднего, например в больших городах. Кабель с четырехкратным экранированием предназначен для использования в местах с очень высоким уровнем электромагнитных излучений, например в промышленных районах вблизи мощных электрических установок, мощных радиопередатчиков, линий электропередачи и метрополитена. В будущем, по мере распространения цифровых сетей передачи стандартная степень экранирования (90 дБ) будет рассматриваться как минимально допустимая. При наличии обратного канала это требование ужесточается и необходимым минимумом становится трехкратное или даже четырехкратное экранирование.

8.4. Возникновение отражений

... Передача сигнала между различными приборами кабельной системы с помощью коаксиального кабеля может быть эффективной только в том случае, если, кроме прочих условий, выполняется условие согласования импеданса всех элементов системы. Импедансом (impedance) называется полное сопротивление элемента системы по входу или выходу. К элементам кабельной системы относятся различные пассивные приборы (ответвители, делители) и усилители, а также сам коаксиальный кабель. Следовательно, условие согласования импеданса означает, что собственные входные и выходные сопротивления всех активных и пассивных приборов должны быть равны сопротивлению кабеля. Поскольку для кабельных систем передачи стандартное значение сопротивления кабеля принято равным 75 Ом, то и все приборы в системе должны иметь входные и выходные сопротивления, равные номинальному значению 75 Ом.

Точка кабельной системы, в которой происходит более или менее резкое изменение сопротивления, т.е. нарушается условие согласования импеданса, называется нерегулярностью. Нарушение условия согласования импеданса в кабельной системе вызывает появление отражений. Рассмотрим реальную ситуацию, когда сигнал передается по кабельной системе, включающей несколько отрезков коаксиального кабеля и несколько приборов (ответвителей, делителей, усилителей). Допустим, что в этой системе есть точки нерегулярностей, в которых полное сопротивление отклоняется от номинального значения. Местоположение этих точек пока не уточняется, поскольку важен сам факт их присутствия в системе. Физические свойства электромагнитного сигнала таковы, что, приходя в точку нерегулярности, сигнал отражается от этой точки. При этом возникает сразу две проблемы. Во-первых, часть энергии сигнала, передаваемая в нужном, прямом направлении теряется и, следовательно, эффективность передачи уменьшается. Во-вторых, отразившаяся часть сигнала, распространяясь по кабельной системе в обратном направлении, будет создавать помехи полезному первичному сигналу.

Нерегулярности могут образовываться в точках подключения кабеля к входу или выходу приборов, а также во внутренней структуре коаксиального кабеля. Нерегулярности во внутренней структуре кабеля возникают в том случае, когда кабель имеет внутренние дефекты, которые могут образоваться при производстве и прокладке кабеля. О наличии дефектов кабеля свидетельствуют резкие всплески в его амплитудно-частотной характеристике затухания. Если таких дефектов в кабеле нет, то сопротивление коаксиального кабеля можно считать примерно постоянным вдоль всего отрезка кабеля. Внутренние нерегулярности нормального кабеля незначительны и ими всегда можно пренебречь. Основные проблемы с отражениями появляются при включении в кабель каких-либо приборов, входной или выходной импеданс которых не равен полному сопротивлению кабеля. В этом случае избежать отражений не удастся по двум причинам. Первая причина состоит в том, что добиться абсолютно точного равенства двух сопротивлений невозможно в принципе. Как бы близки по значению они не были, некоторое различие все-таки будет создавать слабую нерегулярность в точке их соединения. Реально здесь можно говорить только о допустимой несогласованности импеданса. Вторая причина носит чисто технологический характер. Даже при точном равенстве (предположим, что это возможно) сопротивления кабеля сопротивлению прибора появление отражения неизбежно, поскольку

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

ку любое соединения кабеля с входом или выходом прибора выполняется при помощи резьбового кабельного разъема и каким бы качественным не был этот разъем, в точке соединения возникает нерегулярность. Это очевидно, поскольку в точке соединения задействованы сразу три устройства – кабель, вход прибора и разъем. Использование некачественных разъемов может испортить соединение и привести к сильному росту отражений.

Кроме этих отражений, очевидные отражения возникают на грубых нерегулярностях, таких как нетерминированное окончание кабеля или разрыв проводника кабеля. Для устранения отражений на нетерминированном окончании применяют специальные заглушки (терминаторы), имеющие сопротивление 75 Ом и устанавливаемые в свободное окончание кабеля. Роль заглушки та же – обеспечить равенство импедансов.

Поскольку отражения в кабельных системах неизбежны, влияние нежелательного отраженного сигнала на полезный сигнал и, в итоге на качество изображения, существует всегда. Задача разработчика состоит только в минимизации отраженной энергии или поддержании ее в допустимых пределах. Отражение вызывает в изображении тот же видимый эффект ореола или двойного контура, который возникает при многократном приеме одного и того же эфирного вещательного сигнала, отраженного от каких-либо препятствий. Отличие только в том, что влияние отражений в кабельных системах обычно не так заметно. Разберемся, каким образом отраженный сигнал влияет на работу кабельной системы. В результате отражения от нерегулярности часть сигнала начинает распространяться по кабелю в противоположном направлении. Дойдя до входной точки начала данного участка системы, отраженный сигнал также может снова отразиться и снова изменит свое направление, на этот раз распространяясь уже в первоначальном прямом направлении, как и исходный сигнал. Следовательно, в конечную точку данного участка сети придут два абсолютно одинаковых сигнала, но, поскольку испытавший два отражения сигнал проходит более длинный путь (в три раза), чем исходный сигнал, отраженный придет туда с задержкой. Одинаковыми эти сигналы будут только по своей информационной нагрузке, но по амплитуде отраженный сигнал будет слабее. В результате поступления на вход телевизионного приемника абонента этих двух сигналов они оба будут детектированы и отображены на экране с некоторой разностью во времени. Это создаст эффект вторичного контура, смещенного горизонтально от оригинального изображения на величину, зависящую от времени задержки. На экране телевизора сперва «рисует» первое оригинальное изображение, а затем второе задержанное изображение, которое слегка сдвинуто вправо по экрану. Насколько неприятным оказывается этот эффект для зрителя, зависит как от разности во времени между двумя изображениями, так и от амплитуды отражения. Когда задержка очень мала, то взаимное горизонтальное смещение двух изображений будет очень слабым и не заметным для зрителя, даже если отраженный сигнал имеет большую амплитуду, т.е. оба сигнала будут детектироваться и отображаться на экране, но они не будут смещены друг от друга настолько, чтобы восприниматься как два отдельных изображения.

Для оценки величины смещения примем горизонтальную линию телевизионного изображения (строку) за единицу времени, требующуюся для перемещения электронного луча по экрану слева направо. Используемый в России телевизионный стандарт SECAM устанавливает такую структуру кадра, при ко-

тором одна строка, исключая импульсы гашения и синхронизации, занимает 52,5 мкс. Если необходимо определить влияние задержки отраженного сигнала, то можно выразить ее в процентах от этого времени и сопоставить полученную величину с шириной экрана телевизора, чтобы получить значение смещения отраженного сигнала на экране в сантиметрах. Допустим, задержка составляет 0,4 % от 52,5 мкс (0,21 мкс), тогда при ширине экрана 25 дюймов (63,5 см) она выразится в смещении отраженного изображения относительно оригинального примерно на 0,2 мм.

Если отраженная энергия заключается только в какой-либо части спектра ТВ сигнала, то такое отражение называется эхом и оно будет влиять только на какой-либо компонент ТВ изображения. Если отраженная энергия присутствует во всем спектре ТВ сигнала, то явление называется собственно отражением и влияет оно на все составляющие воспроизводимого ТВ сигнала. Если отраженный сигнал распределен равномерно или почти равномерно по всему спектру телевизионного канала то на экране будет полностью воспроизводиться повторное изображение. Если нерегулярность такова, что создает отражение на частотах, занимающих только часть телевизионного спектра, то на экране появится эффект окантовки или двойного контура. Отражение или эхо всегда слабее (ниже по амплитуде), чем первичный сигнал. Когда несколько отражений одновременно присутствует в системе, обычно визуально преобладает какое-либо одно, а другие практически незаметны. Степень повреждения телевизионного изображения зависит от совокупности двух факторов – амплитуды и задержки. Если задержка значительна, то отражение будет ясно различимо только при высокой амплитуде отраженного сигнала. Но если задержка очень мала, то даже отражение с большой амплитудой не будет создавать помех. Вообще восприятие задержки видеоинформации зрителем довольно сильно зависит от характера самой видеоинформации. Например, для алфавитно-цифровой информации отражение будет заметно гораздо сильнее, чем для быстро движущихся изображений и анимации.

Характер видеоинформации, амплитуду и временную задержку отражения трудно связать математически, поэтому на практике их связь как правило оценивается эмпирически, на основе опыта и наблюдений, т.е. с помощью субъективной оценки тестовых программ зрителями. На той же основе устанавливались стандарты для оценки влияния шума на телевизионное изображение. Эти тесты показывают, что отраженный сигнал с задержкой 500 нс и уровнем на 30 дБ ниже амплитуды первичного сигнала ощущается средним зрителем, а сигнал с задержкой 500 нс и уровнем на 20 дБ ниже первичного сигнала может восприниматься только некоторыми зрителями.

Величину отражений в системе передачи можно оценивать с помощью нескольких показателей, имеющих сходный физический смысл. Для оценки той доли энергии, которая была отражена от точки несовпадения импедансов (нерегулярности), было введено понятие возвратных потерь (*return loss, RL*). Коэффициент возвратных потерь, который также называется затуханием несогласованности – это отношение значений напряжения (или мощности) падающей и отраженной волн, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$RL = 20 \lg \frac{U_{\text{пад}}}{U_{\text{отр}}} = 10 \lg \frac{P_{\text{пад}}}{P_{\text{отр}}}$$

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

Измеряется коэффициент возвратных потерь в децибелах. Из определения ясно, что коэффициент возвратных потерь должен быть максимален, поскольку, чем меньше отраженная энергия, тем большим числом будут выражаться возвратные потери. Чем больше возвратные потери прибора, тем более качественным является данный прибор. Допустим, что коэффициент возвратных потерь составляет 20 дБ. Это означает, любой поданный на вход этого прибора сигнал будет порождать отраженный сигнал, уровень которого на 20 дБ ниже уровня первоначального входного сигнала. Если бы возвратные потери были равны 0 дБ (наихудший случай), то это означало бы, что 100% подаваемой в кабель энергии отражается от входа прибора. Показатели возвратных потерь задаются производителем для любого прибора и кабеля в его технической спецификации. Величина возвратных потерь для кабеля характеризуется параметром, называемым структурными возвратными потерями SRL , определение которого аналогично определению RL .

Другим показателем, с которым связана величина возвратных потерь, является коэффициент стоячей волны КСВ. В зарубежной литературе он называется SWR (standing wave ratio). Если возвратные потери были бы равны 0 дБ (наихудший случай), то SWR имеет бесконечную величину. Коэффициент возвратных потерь вычисляется через значение SWR по формуле:

$$RL = 20 \lg \frac{SWR + 1}{SWR - 1}.$$

Например, коэффициент возвратных потерь 21 дБ, приблизительно соответствует значению коэффициента стоячей волны 1,2. Общепринято, что КСВ пассивных коаксиальных приборов должен быть меньше 1,3.

Кроме величин RL и SWR для кабельной системы рассчитывают еще коэффициент отражения или отношение сигнал-отражение (отношение S/R), которое показывает, на какую величину в децибелах уровень первоначального сигнала превосходит уровень отраженного сигнала в той же точке. Отношение S/R рассчитывается, как правило, не для отдельного прибора, а для участка кабельной сети. Таким образом, отношение вычисляется как разность этих двух уровней следующим образом:

$$S/R = S_{\text{пад}} - S_{\text{отр}}.$$

Коэффициент отражения измеряется тем же способом, но в процентах от уровня падающего сигнала. Далее рассмотрим отдельно возникновение отражений в коаксиальном кабеле и в точках подключения отрезков кабеля к приборам.

8.5. Отражения во внутренней структуре кабеля

Технологический процесс производства коаксиального кабеля позволяет обеспечить почти постоянное значение импеданса по всей длине отрезка кабеля, так как наличие нерегулярностей во внутренней структуре коаксиального кабеля контролируется в процессе производства. Современные коаксиальные кабели имеют высокие показатели возвратных потерь (около 30 дБ), поэтому обычно при расчете кабельной сети отражениями во внутренней структуре кабеля можно пренебречь. Однако, в отсутствии контроля при производстве коаксиального кабеля могут периодически образовываться механические дефекты

8.5. Отражения во внутренней структуре кабеля

в структуре, которые являются точками несоответствия импеданса и могут создавать значительные отражения. Возвратные потери в таких точках внутренней структуры кабеля возрастают и опасность здесь даже не столько в величине этих потерь, сколько в периодичности расположения этих точек вдоль отрезка кабеля. Дело в том, что в процессе производства кабель проходит через несколько стадий намотки. Если на поверхности устройств намотки есть какой-либо дефект, то незначительные нерегулярности могут появиться вдоль всего отрезка кабеля точно на одном и том же расстоянии друг от друга.

Проблемы с отражениями во внутренней структуре кабеля могут возникать не только в процессе его производства, но и вследствие сильных механических воздействий на кабель во время его прокладки. В случаях прокладки кабеля не по прямому направлению, обхода углов зданий или поворотов, когда толстый коаксиальный кабель приходится сгибать, нужно соблюдать осторожность, чтобы избежать перегибов и петель на кабеле, поскольку каждый такой перегиб представляет собой нерегулярность и создает отражение в системе. Периодичность расположения вдоль кабельного участка множества слабых нерегулярностей, которые по отдельности не представляют собой опасности, может стать проблемой. Четкая периодичность усиливает влияние нерегулярностей. Например, при подвесной прокладке кабеля, изгиб формируется на каждом креплении кабеля к опорной мачте. Поскольку расстояния между опорами могут повторяться, то малые создаваемые каждым промежутком отражения могут складываться в фазе друг с другом и, тогда, суммарное отражение станет проблемой.

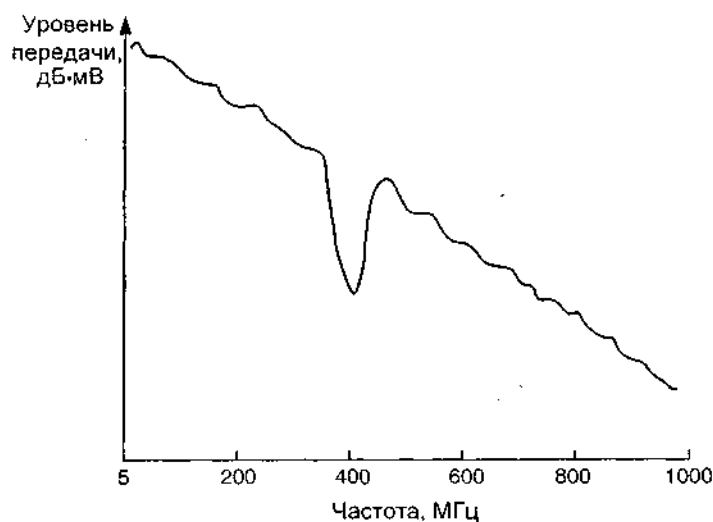


Рис. 8.4. Амплитудно-частотная характеристика передачи участка с нерегулярностью в кабеле

В обоих случаях результаты оказываются одинаковыми — резко возрастают потери в какой-либо одной узкой области спектра передачи, обычно затрагивающей один канал или несколько смежных каналов (см. рис. 8.4). Это создает эффект включения в кабель узкополосного режекторного фильтра. В крайних случаях это приводит к тому, что отрезок кабеля становится непригодным для передачи одного или нескольких каналов. Все, что можно сделать в таком слу-

чае – это заменить поврежденный участок кабеля. Сильные нерегулярности недопустимы и их необходимо выявлять при тестировании кабеля во время первоначальной настройки системы.

8.6. Отражения в коаксиальной системе передачи

Возвратные потери определяются для любого прибора кабельной сети (пассивного или активного). В кабеле обычно возвратные потери высоки (около 30 дБ) и ими можно пренебречь. С прочими приборами кабельной сети дело обстоит иначе. Для усилителей наихудшее значение обычно составляет 16 – 18 дБ, а для большинства пассивных приборов возвратные потери определяются значением 20 дБ или менее, поэтому эти значения необходимо учитывать при расчете усилительных участков. Спецификация всегда определяет наихудшее в полосе пропускания кабеля значение возвратных потерь. Это значит, что прибор может иметь существенно лучший показатель на некоторых частотах. Для всех приборов возвратные потери определяются по входу и по выходу.

Хотя при разработке усилителей и других приборов системы стараются точно уравнивать сопротивление прибора с импедансом кабеля, некоторое несоответствие все же существует. Посмотрим, каким оказывается результат этого несоответствия. На рис. 8.5 показан пример соединения прибора, в данном случае ответвителя, с отрезком коаксиального кабеля. На вход ответвителя подается радиочастотный сигнал с уровнем +36 дБ·мВ. В спецификации ответвителя определено, что он имеет возвратные потери 20 дБ. Этот отраженный сигнал будет распространяться по кабелю в обратном направлении так, как распространялся бы полезный сигнал, направленный в окончание кабеля. В приведенном примере на рис. 8.5 уровень отраженного сигнала составляет +16 дБ·мВ, что на 20 дБ ниже уровня входного сигнала +36 дБ·мВ.

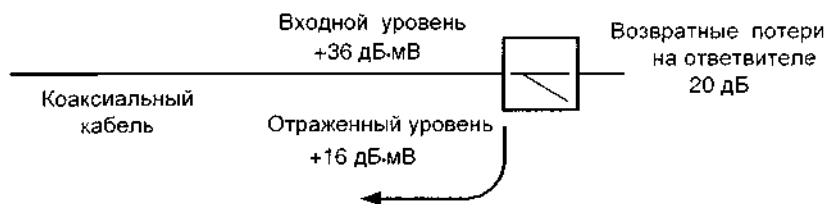


Рис. 8.5. Возвратные потери прибора

На рис. 8.6 изображены два ответвителя, соединенных кабелем длиной 120 м, который имеет потери передачи 4 дБ. Для обоих приборов возвратные потери и по входу и по выходу определены значением 20 дБ. Дано, что уровень сигнала на выходе первого ответвителя, т.е. на входе кабельного участка, равен +40 дБ·мВ. Уровни отраженного сигнала показаны на рисунке в нескольких точках системы. Поскольку возвратные потери одинаковы для входов и выходов, то при каждом отражении в точке соединения уровень отраженного сигнала снижается на одну и ту же величину. В данном примере не учитывалась зависимость возвратных потерь от частоты, а предполагался наихудший случай (возвратные потери минимальны).

При потерях передачи в кабеле 4 дБ уровень сигнала на входе второго ответвителя составляет +36 дБ·мВ. Отраженный сигнал слабее на 20 дБ и имеет уровень +16 дБ·мВ.

8.6. Отражения в коаксиальной системе передачи

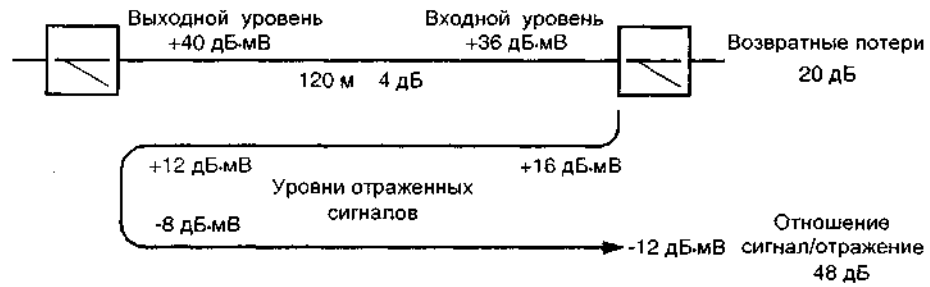


Рис. 8.6. Отношение S/R длинного кабельного участка

Сигнал, отразившийся от входа второго ответвителя, далее распространяется по кабелю в обратном направлении и снова теряет 4 дБ, в результате чего он оказывается на выходе первого ответвителя с уровнем +12 дБ·мВ. Отражаясь от выхода первого ответвителя, он теряет еще 20 дБ и выходит из этой точки уже с уровнем -8 дБ·мВ. На вход второго ответвителя он приходит с уровнем -12 дБ·мВ. Поскольку уровень первоначального сигнала в этой точке (на входе второго ответвителя) составлял +36 дБ·мВ, то отношение уровней отражение-сигнал (отношение S/R) будет равно $36\text{дБ} - (-12\text{дБ}) = 48\text{дБ}$. В данной схеме отношение S/R будет иметь такое значение при любом уровне первоначального сигнала. Например, если уровень сигнала на входе кабельного участка равен +30 дБ·мВ, то уровень отраженного сигнала на входе второго ответвителя будет равен -18 дБ·мВ, т.е. также на 48 дБ ниже.

Уровень отраженного сигнала по отношению к уровню первоначального сигнала при их одновременном присутствии на входе ТВ приемника имеет огромное значение для того, как будет восприниматься отражение на экране телевизора. Очевидно, что высокий показатель обратных потерь наиболее желателен для всех приборов потому, что при этом ослабляется мешающий эффект отражения, хотя длина и, следовательно, затухание в кабеле также имеет значение.

Рассмотрим схему на рис. 8.7 где расстояние между ответвителями равно 20 м. Кабель такой длины имеет потери 0,7 дБ. Уровень на входе кабельного участка, как и раньше, равен +40 дБ·мВ, и на каждом ответвителе обратные потери составляют 20 дБ. Повторив предыдущие вычисления со значением потерь передачи 0,7 дБ, получим, что уровень на входе второго ответвителя равен -2,1 дБ·мВ. Поскольку первоначальный сигнал в этой точке имел уровень +39,3 дБ·мВ, то отношение S/R теперь будет составлять 41,4 дБ.

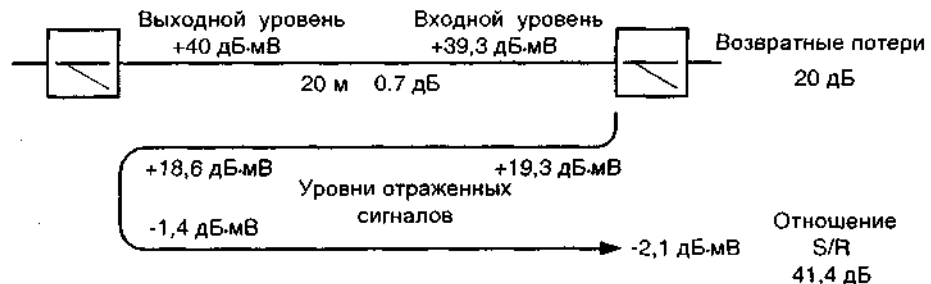


Рис. 8.7. Отношение S/R короткого кабельного участка

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

Так как никакие другие параметры в системе не изменялись, становится очевидным, что на более коротком расстоянии (или при меньших потерях в кабеле) отношение S/R ухудшается, т.е., повышается уровень отраженного сигнала по сравнению с уровнем первичного сигнала. Более короткие кабельные участки могут встречаться в городских условиях плотной застройки, когда дома расположены близко друг к другу. В обоих примерах, если бы вместо одного из приборов был установлен усилитель с более низкими возвратными потерями, то амплитуда отраженного сигнала была бы еще выше. И, наоборот, если бы приборы имели более высокие возвратные потери, то отношение S/R было бы лучше.

Из приведенных примеров видно, как возвратные потери приборов и расстояние между ними в совокупности влияют на амплитуду отраженного сигнала. Однако, этот взгляд на проблему является несколько упрощенным. В действительности нужно учитывать не только амплитуду, но и время задержки отраженного сигнала.

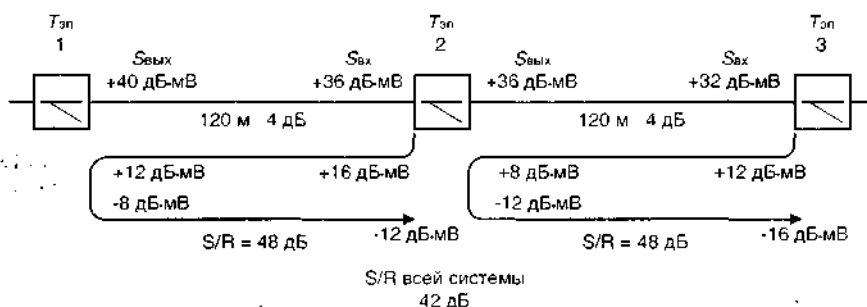


Рис. 8.8. Отражения в системе с тремя ответвителями

В примере на рис. 8.6 видно, что отраженный сигнал, пройдя первый раз через кабель в прямом направлении, и вернувшись в его начало, а затем, снова пройдя по кабелю, преодолевает большее расстояние, чем первоначальный сигнал и, поэтому требует больше времени для прихода в точку назначения (на вход второго ответвителя). В этой системе присутствует только одно отражение, которое надо учитывать и, поэтому расчет уровней сигналов довольно прост. Более того, вносимые приборами возвратные потери таковы, что позволяют просто пренебречь отраженным сигналом в большинстве случаев. Однако, в реальных кабельных системах на протяжении маршрута кабеля включено множество пассивных и активных приборов, поэтому в системе появляется несколько отражений, которые складываются друг с другом с различными фазами. Сдвиг фазы, полученный отраженным сигналом в момент его прихода в точку назначения, будет определяться длиной его пути по отношению к длине волны этого сигнала. Соотношение фаз отраженных сигналов имеет решающее значение для величины амплитуды отражения в реальной системе.

На рис. 8.8 показана система, в которой добавлен еще один кабельный участок длиной 120 м и третий ответвитель. Предположим, что оба расстояния между ответвителями в точности равны 120 м, второй ответвитель имеет потери на проход 0 dB и все три ответвителя имеют возвратные потери 20 dB и на входах и выходах. Для простоты расчета примем, что уровень на входе 1-го ответвителя равен +40 dB-mV, как было ранее. Поскольку все условия в точно-

сти совпадают с условиями примера на рис. 8.6, уровень отраженного сигнала на входе 2-го ответвителя будет равен -12 дБ·мВ. Уровень первичного сигнала на входе 3-го ответвителя теперь будет равен $+32$ дБ·мВ. Поскольку возвратные потери и потери передачи в кабеле на участке между 2-м и 3-м ответвителями идентичны тем же величинам на участке между 1-м и 2-м ответвителями, то можно вычислить, что уровень отраженного сигнала на входе 3-го ответвителя будет на 48 дБ ниже, чем уровень первичного сигнала в той же точке. Т.е. его уровень отраженного сигнала будет составлять $32 - 48 = -16$ дБ·мВ.

Заметим, что оба кабельных участка имеют отношение S/R , равное 48 дБ. Из предыдущих глав известно, что комбинирование двух равных отношений (по напряжению) дает результат, отличающийся на 6 дБ от комбинируемых значений. При наложении отраженных сигналов, находящихся в фазе, произойдет их сложение по амплитуде, т.е. результирующее отношение S/R будет ниже на 6 дБ и общее комбинированное отношение S/R системы составит 42 дБ (наихудший случай). Если же отражения находятся в противофазе, они погасят друг друга и тогда общее отношение S/R улучшится на 6 дБ (идеальный случай). Но эти вычисления правомерны только в предположении, что при каждом отражении происходят абсолютно одинаковые смены фаз. При этом условии случай складывающихся однофазных отражений является наилучшим, а случай противофазных отражений наоборот, поскольку они полностью гасят друг друга. Но в действительности ни то ни другое в точности не достигается, так как возникающие при отражениях скачки фаз несколько отличаются друг от друга. В этом решающую роль играет то, что точное совпадение длин кабельных участков невозможно.

Рассмотрим, каким в действительности оказывается результат взаимодействия нескольких отражений в кабельных системах (на примере двух отражений в той же системе с тремя ответвителями). Для того, чтобы установить соотношение фаз отраженных взаимодействующих сигналов, будем соотносить задержку с половиной длины волны исследуемого сигнала. Разумеется, это относится к случаю отраженных сигналов одной частоты (или длины волны). Если два отраженных сигнала подвергаются одинаковым задержкам, то и такие отражения складываются (разность фаз между ними будет равна нулю), а полученное S/R системы оказывается ниже на 6 дБ. Если задержка передачи между двумя отраженными сигналами кратна четному числу длин полуволн, то такие отражения также будут находиться в фазе и складываться. Если один сигнал задержан относительно другого на четверть длины волны, то отражения будут находиться не в фазе и между ними произойдет некоторое (неполное) взаимное гашение.

Задержка сигнала связана с пройденным им расстоянием через скорость распространения. Скорость распространения радиоволн в воздухе равна скорости света ($3 \cdot 10^8$ м/с). Отсюда легко выразить длину волны, поскольку она равна расстоянию, которое проходит волна за один свой полный цикл. Если радиоволна распространяется в диэлектрическом материале, отличном от воздуха, то наблюдается замедление или снижение скорости ее распространения. Поэтому в любом диэлектрике волна за один цикл проходит меньшее расстояние и длина волны оказывается короче, чем в воздухе. В первых пористых диэлектриках, применявшихся в коаксиальных кабелях, скорость распространения составляла примерно 81% от скорости света в воздухе. Зная это, можно выразить половину длины волны в метрах для любого значения частоты, как в

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

свободном пространстве (в воздухе), так и различных диэлектриках. В табл. 8.4 представлены результаты таких вычислений для кабелей с различными диэлектриками. Результаты даны для двух значений частоты (канал R2 и канал R11), чтобы яснее представлять характер этой зависимости. Эти данные будем использовать далее для проверки того, что оба отражения оказываются в фазе (на примере канала R2).

Таблица 8.4

Длина полуволны в различных диэлектриках

Частота видеонесущей, МГц	λ, м		
	Воздух	Пористый	Твердый
59,25 (R2)	2,6	2,0	1,7
215,25 (R11)	0,7	0,5	0,4

На рис. 8.8 протяженность кабельного участка между 1-м и 2-м ответвителями равна 120 м. Разделив это значение на длину полуволны в пористом диэлектрике для частоты канала R2, получим, что на расстоянии между этими ответвителями укладывается 60 полуволн или 120 четвертьволновых длин. Так как протяженность второго кабельного участка тоже равна 120 м, то на расстоянии между 2-м и 3-м ответвителями также помещается 60 полуволн. Очевидно, что сигналы на этих участках находятся в фазе, поэтому происходит их сложение по амплитуде напряжения и если отношения S/R обоих сигналов равны 48 дБ, то отношение S/R системы будет на 6 дБ хуже, т.е. составит 42 дБ. Заметим, что на входе 3-го ответвителя уровень первоначального сигнала был равен +32 дБ·мВ, следовательно, уровень полезного сигнала теперь на 42 дБ ниже уровня отражения, который составляет -10 дБ·мВ. Поскольку все потери в кабелях и возвратные потери остались прежними, то ухудшение отношения S/R полностью объясняется синфазностью двух накладываемых отражений.

На рис. 8.9 второй кабельный участок укорочен до длины 119 м, т.е. всего на 1 м. Разделив протяженность этого участка на длину волны для канала R2 (1 м), получим, что на участке помещается уже не 120, а 119 четвертьволновых длин. Это небольшое изменение длины кабеля не вызовет значительного изменения потерь в кабеле, и можем считать, что потери на этом участке по-прежнему равны 4 дБ. Возвратные потери также остаются прежними, поэтому отношения S/R для обоих участков равны 48 дБ, как и раньше. Но теперь отражения на двух участках оказываются не в фазе и должны погасить друг друга полностью, хотя на практике это обычно не достигается. Отношение S/R системы будет лучше на 6 дБ и составит 54 дБ. Это изменение (в данном случае улучшение) опять, как и в предыдущем примере, объясняется только соотношением фаз отражений, которое зависит от длин кабеля, поскольку никакие другие параметры не изменялись. Если уменьшить протяженность второго кабельного участка еще на 3 метра, то общая его длина составит 116 м и это расстояние будет равно 58 длинам полуволн для частоты канала R2. Разность между расстояниями 120 м (60 полуволн) и 116 м (58 полуволн) составляет 4 м, т.е. 2 полуволны. Таким образом, отражения снова будут в фазе и суммируются, а отношение S/R всей системы ухудшится до значения 42 дБ.

8.6. Отражения в коаксиальной системе передачи

Если сделаем подобный анализ для частоты канала R11, то обнаружим тот же эффект, учитывая, что все расчеты надо проводить для другого значения длины полуволны (0,5 м), соответствующей его частоте. При изменении протяженности кабельного участка также будем получать расстояния, на которых отражения синфазны, и расстояния, на которых они имеют разность фаз, отличную от нуля. Когда сделаем расстояние между приборами слишком большим, то задержка между отражениями станет настолько значительной, что ее будет достаточно для того, чтобы считать эти отражения двумя отдельными сигналами, и вопрос их сложения и гашения станет несущественным.

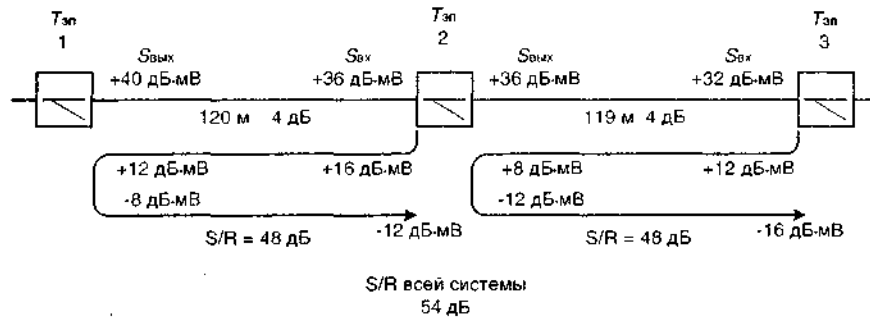


Рис. 8.9. Отражения в системе из трех ответвителей

Из приведенных примеров видно, что результат взаимодействия отражений определяется разностью длин кабельных участков в системе, поэтому заранее нельзя точно определить, какой будет амплитуда отражения в интересующей разработчика точке. Например, невозможно выявить какого-либо правила, которое говорило бы, что нужно избежать прокладывания системы из участков длиной 200 м, поскольку вероятность того, что эти длины окажутся в точности равными 200 м, крайне мала. Как только что выяснили, отличие в длине кабеля всего лишь на 1 метр для канала R2 (для канала R11 это отличие будет еще меньшее) смогло заметно снизить амплитуду отражения. Можно только сказать, что в целом ситуация определяется периодичностью расстояний в системе, т.е. тем, как часто встречаются в системе кабельные участки одинаковой длины, но нужно помнить, что даже небольшое из различие может улучшить или ухудшить ситуацию. При прокладывании любой системы передачи вынуждены работать с планами трассировки кабеля и другими данными, не предоставляющими той степени точности, которая позволила бы полностью решить проблему отражений в проекте. Можно ожидать, что некоторый процент отражений на очевидно опасных участках будет находиться в фазе и погасится. Также следует иметь в виду, что отражения, которые накапливаются, складываясь в фазе, станут сильно заметными только в конечных точках системы для небольшого процента абонентов. Радиальная структура кабельной сети, при которой фидерный кабель разветвляется на несколько направлений передачи, обеспечивает некоторую степень изоляции от каскадов ответвителей более высокого уровня, и при резком возрастании синфазных отражений позволяет отключить нагрузку некоторых ветвей. Во всех примерах для упрощения рассматривались участки системы, включающие только ответвители. Количество ответвителей в системе превосходит количество любых других приборов,

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

поэтому их влияние на рост отражений можно считать более значительным, но механизм возникновения отражений на других приборах полностью аналогичен рассмотренному здесь.

Стоит сказать отдельно об особенностях накопления отражений в системах разного масштаба. Сначала рассмотрим крупные системы, обслуживающие абонентов, например, в городских условиях. Здесь требуется подключить большое число абонентов, поэтому высока плотность ответвителей на маршруте кабеля, а расстояния между ними невелики. При этом можно ожидать высокую степень периодичности кабельных участков определенной длины из-за регулярности городской застройки или привязки монтажа ответвителей к местным проводным линиям, опорные точки которых расположены на примерно одинаковых расстояниях друг от друга. Регулярность структуры кабельной сети зависит от способа прокладки кабеля и размеров микрорайона, которые обычно одинаковы в пределах города. Пример такой кабельной системы показан на рис. 8.7, где кабельный участок имеет длину 20 м. Время передачи на такое расстояние по кабелю с пористым диэлектриком, для которого скорость распространения равна около 4,3 м/нс, составляет примерно 86 нс. Отраженный сигнал получит втрое большую задержку, т.е. 258 нс. Следовательно, разность в задержках прямого и отраженного сигналов составит около 172 нс (0,172 мс). По сравнению со временем развертки одной строки телевизионного изображения (52,2 мс) эта величина составляет лишь 0,3 % от длительности строки. На 29-дюймовом экране телевизора это вызовет смещение меньше 1 мм, что практически не будет ощущаться зрительно. Т.е. задержка отражения относительно первоначального сигнала здесь будет настолько мала, что даже если из-за синфазного сложения амплитуда отражения увеличится, оно не будет заметно. То же самое справедливо и для более протяженных систем. На примере множества действующих систем типа транк-фидер очевидно доказано, что отражения не могут представлять никакой проблемы в каскадах, включающих порядка 40 ответвителей.

При строительстве малой кабельной сети в условиях, где расстояния между ответвителями будут более длинными и плотность ответвителей меньше (например, в сельской местности) можно ожидать, что отраженные сигналы будут претерпевать значительные задержки и создавать более сильные помехи. Однако, к положительным факторам относится то, что нагрузка здесь очень мала и регулярность застройки менее выражена. Математические исследования и испытания на длинных каскадах ответвителей показывают, что каскады малых систем, включающие порядка 100 ответвителей совершенно нечувствительны к отражениям. Там, где ситуация требует применения еще большего числа ответвителей в каскаде, возможным решением является разгрузка каскада путем отключения или перебрасывания ответвляемой нагрузки некоторых ответвителей на короткие участки параллельно проложенного кабеля.

Таким образом, если отражения в системе становятся существенными и создают видимые помехи изображению, рекомендуемый подход к проектированию в этом случае состоит в рассредоточении нагрузки по отдельным фидерам кабельной структуры для изоляции ответвителей друг от друга. Такой метод минимизации отражений практиковался в кабельных сетях ранее, когда использовались прессованные ответвители, которые, представляли собой значительные нерегулярности и отражения на них были довольно серьезной проблемой. Другим, более простым решением, которое и используется сейчас

8.6. Отражения в коаксиальной системе передачи

практически повсеместно, является применение более качественных ответвителей с более высокими коэффициентами возвратных потерь. Приборы, производимые в настоящее время, имеют значительно улучшенные характеристики возвратных потерь, хотя их стоимость немного выше. Нормы на величины возвратных потерь приборов, обеспечивающие практически полное устранение отражений в системе, определены в стандартах современных кабельных систем. Однако, и в случае соблюдения этих норм нельзя забывать о качестве выполнения кабельных разъемов.

Нормативные требования к коэффициенту возвратных потерь прибора зависят от его местоположения и назначения в системе, а также условий работы, среди которых автоматическая или ручная регулировка усиления и наклона, наличие или отсутствие встроенных эквалайзеров и аттенуаторов. Стандарты ГОСТ Р52023-2003 и EN 50083 нормируют возвратные потери приборов по категориям и группам исполнения, которые представлены в табл. 8.5. Нормативные значения коэффициента возвратных потерь по группам исполнения оборудования согласно требованиям стандарта приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.5

Категории и группы исполнения элементов линейной сети по затуханию несогласованности

Тип оборудования	Группа исполнения		
	первая категория	вторая категория	третья категория
1. Усилители	В	С	-
2. Распределители	А	В	С
3. Ответвители	А	В	С
4 Абонентские розетки: – по входу и выходу (для проходных розеток); – по выходу радиосигналов вещательного телевидения	-	В С	-

Таблица 8.6

Нормы на затухание несогласованности для оборудования различных групп исполнения

Группа исполнения	Полоса частот, МГц	Значение, дБ
А	5 – 40	>22
	40 – 1750 МГц	>22 – 1,5 дБ/октава
В	5 – 40 МГц	> 18
	40 – 1750 МГц	>18 – 1,5 дБ /октава
С	5 – 40 МГц	>14
	40 – 1750 МГц	> 14 – 1,5 дБ /октава
Д	5 – 1750 МГц	>10

Глава 8. Коаксиальные кабели и компоненты

Условием хорошего согласования считается условие, при котором коэффициент возвратных потерь оборудования соответствует требованиям этой таблицы. Производитель должен указывать в спецификации любого прибора категорию, по которой был измерен коэффициент возвратных потерь. Так, например, для магистральных усилителей коэффициент возвратных потерь должен быть измерен в соответствии с категорией В, для домовых усилителей в соответствии с категорией С, а для усилителей других качественных градаций или универсальных усилителей производитель должен указывать минимальный коэффициент возвратных потерь. Некоторые типы усилителей могут иметь различные категории по возвратным потерям для различных портов. Распределительное пассивное оборудование измеряется по категориям А, В и С. Возвратные потери для абонентских розеток на входе измеряются по категории В, на ТВ-выходе по категории С, а на выходах ОВЧ-ЧМ и данных по категории D.

Методы измерения коэффициента возвратных потерь, применимые для оборудования, работающего в диапазоне частот 5 – 1750 МГц, описаны в стандарте EN-50083. Аналогичные методы описаны в ГОСТ Р52023-2003 для оборудования с рабочей полосой 5 – 1000 МГц. Затухание несогласованности со стороны входа устройства измеряют анализатором спектра со следящим генератором и рефлектометром. Плавно изменяя ручную частоту измерителя АЧХ, фиксируют величины затухания несогласованности с помощью анализатора спектра на частотах полосы передачи. Допускается измерение затухания несогласованности косвенным методом, через измерение коэффициента стоячей волны, с помощью измерителя коэффициентов передачи. Измерение затухания несогласованности устройства головной станции проводят во всей полосе частот. Результатом измерений является наименьшее из измеренных значений. Коэффициент возвратных потерь любого прибора измеряется в соответствии с качественной градацией, приведенной в табл. 8.5. Вместе с коэффициентом возвратных потерь любого должны быть измерены потери и неравномерность АЧХ в тестовых точках. Все тестовые точки, в которых выполняются измерения характеристик кабельной системы, также должны быть согласованными, т.е. 75-омными. При этом коэффициент возвратных потерь измерительного оборудования должен быть не менее, чем на 10 дБ выше значения испытываемого прибора или элемента системы.

Резюме

Коаксиальный кабель представляет собой несбалансированную линию передачи, т.е. такую линию, в которой один из проводников используется для передачи сигнала, а второй служит заземляющим с волновым сопротивлением, стандартное значение которого равно 75 Ом. До сих пор он широко используется для строительства последней мили, т.е. на магистральном и домовом участках системы КТВ. На транспортном уровне сети коаксиальный кабель в настоящее время практически полностью вытеснен волоконно-оптическим кабелем, имеющим несравнимо лучшие показатели качества, но более высокую стоимость.

Выбор кабеля производится исходя из его технических характеристик, наиболее важными из которых являются потери в заданной полосе частот, возвратные потери, коэффициент экранирования. Кроме этого, при проектировании кабельной структуры необходим серьезный экономический анализ для за-

данных условий проектирования, при котором учитывается стоимость прокладки, пригодность кабеля для разных участков сети, возможность последующей реконструкции и стоимость эксплуатации и технического обслуживания. Сделать правильный выбор кабеля можно на основе сравнительного анализа результатов, полученных для нескольких альтернативных вариантов с различными марками кабеля и плотностями ответвленной нагрузки на километр кабеля.

Отражения в кабельной системе возникают вследствие несовпадения импедансов в точках соединения участков кабеля с входами и выходами приборов системы, а также из-за механических повреждений внутренней структуры кабеля. Показателем, с помощью которого разработчик оценивает величину отражений в системе, является коэффициент возвратных потерь, измеряемый в децибелах. Показатели возвратных потерь определяют степень влияния отражения на качество передачи в оконечных точках системы. Для кабеля существенными являются возвратные потери во внутренней структуре, но ими можно пренебречь. Для приборов существенны значения возвратных потерь по входу и по выходу.

Если задержанный по времени сигнал действует на вход ТВ приемника вместе с первичным сигналом, то задержка выражается в горизонтальном смещении задержанного изображения. При оценке влияния отражения на качество изображения должны учитываться как соотношение амплитуд первичного и отраженного сигналов, так и сдвиг фаз между первичным и отраженным сигналами. Сдвиг фаз зависит от соотношения длины волны передаваемого сигнала и пройденного им расстояния. Вероятность точного равенства расстояний, при котором отражения становятся помехой, в реальных системах мала. Обычно в кабельной системе присутствует множество отражений от разных точек, причем уровни сигналов в этих точках могут меняться очень существенно. В некоторых случаях, когда суммарное отражение растет очень сильно, существует возможность перераспределения ответвленной нагрузки для ограничения отражений. Однако, в большинстве случаев достаточно просто использовать приборы показатели возвратных потерь которых соответствуют стандарту.

Глава 9

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

Идея передачи информации с помощью света стала закономерным и необходимым шагом в развитии телекоммуникационных технологий, соответствующим новым требованиям времени к системам передачи информации. Этот способ передачи при своей кажущейся простоте обладает высокой технологичностью. Существуют значительные различия между оптической и коаксиальной технологиями. Во-первых, различаются частоты передачи и типы среды распространения волны. Во-вторых, в основе технологии оптической передачи лежат законы оптики, что определяет особенности распространения светового сигнала в канале. В-третьих, механизм и причины затухания сигнала в оптическом канале иные, чем в канале электрической системы передачи. Используя свет как средство передачи информации, следует рассматривать его не только как волну, но и как поток частиц, разработчику нужно познакомиться с такими понятиями как энергия световой волны, моды световода, затухание света, искажения светового сигнала. В этой главе рассматриваются свойства среды передачи оптических волн, структура, типы и характеристики оптического волокна.

9.1. Передача света по оптическому волокну

В оптической системе передачи учитываются те же основные факторы, что и в коаксиальной системе – потери и искажение сигнала. При распространении в воздухе, стекле или в другой прозрачной среде свет претерпевает потери энергии вследствие поглощения и (или) рассеяния фотонов на атомах среды. Чтобы организовать оптический канал передачи, нужно направить узкий световой луч по закрытой среде, чтобы свет не распространялся по всем направлениям. В оптических телекоммуникационных системах функцию среды передачи выполняет оптическое волокно. Использование оптической кабельной линии передачи не требует соблюдения обычных условий электромагнитной совместимости, которые являются обязательными для электрических систем передачи. Поэтому использование оптической передачи не ограничивается стандартными рамками общественного электромагнитного спектра, выделенного для каналов радиовещания и телевидения в полосе 5 – 1000 МГц. Однако, диапазон частот передачи в оптической системе имеет свои ограничения, связанные со свойствами среды передачи, которой является стеклянное волокно. Подобно другим закрытым линиям передачи (медный проводник или металлический волновод) оптическое волокно направляет и удерживает распространяющуюся по линии волну в пределах самой этой линии. Это осложняет возможность неразрушающего доступа в линию и организацию ее ответвлений в произвольной точке. Ответвители и делители редко используются в оптических системах передачи, но если в них есть необходимость, они устанавливаются при первоначальном строительстве системы.

9.1. Передача света по оптическому волокну

Оптическое волокно, которое также называется световодом, является устройством, предназначенным для передачи световой волны на значительное расстояние. Световод представляет собой узкую трубку с отражающей внутренней поверхностью, заполненную однородным светопропускаемым (прозрачным) материалом. На рис. 9.1 показана структура оптического волокна, представляющего собой простейший оптический волновод. Основным материалом, из которого изготавливается волокно, является стекло. Свет от источника вводится определенным образом в волокно и, попадая в стеклянную сердцевину, отражается от ее внутренней поверхности и снова возвращается внутрь. Таким образом, луч распространяется вдоль всей длины волокна, отражаясь множество раз, пока не достигнет выходного отверстия. Очевидно, затухание световой волны в материале волокна является наиболее существенным показателем эффективности передачи света на большое расстояние. Множество значений угла, под которым свет можно вводить в волокно, называется конусом ввода.

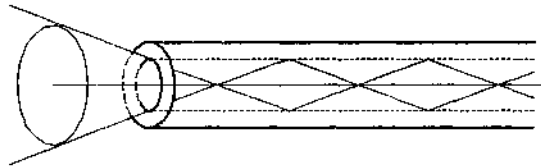


Рис. 9.1. Оптическое волокно

Свет имеет несколько свойств, которые проявляются в любой оптической системе передачи и относятся не только к видимому спектру, но ко всему оптическому спектру. Собственно, принадлежность волны к оптическому диапазону и определяется тем, имеет ли данная волна эти свойства.

Как известно, при падении на поверхность вещества, свет будет либо отражаться от нее, либо проходить внутрь, преломляясь. Диффузное (рассеянное) отражение световых лучей по множеству направлений или просто *диффузия* наблюдается, когда размер нерегулярностей, находящихся на отражающей поверхности, сопоставим с длиной волны падающего света. В результате *преломления* (рефракции) свет, проходящий через границу двух сред с разной плотностью, изменяет скорость и направление распространения. Величина отклонения луча от предыдущего направления определяется соотношением коэффициентов преломления (индексов рефракции) веществ. Коэффициентом преломления вещества является отношение скорости распространения света в вакууме к скорости света в веществе. Скорость света в среде зависит от плотности этой среды, следовательно, в вакууме коэффициент преломления минимален и равен единице. Коэффициент преломления света в воздухе равен 1,003, поскольку скорость света в воздухе лишь немного меньше скорости света в вакууме. Коэффициенты преломления всех других сред больше единицы. Например, для воды это 1,33, а для стекла – 1,51. Только в одном случае свет, переходя через границу сред с разными показателями преломления, не будет преломляться, а сохранит свое прежнее направление распространения – если свет падает перпендикулярно границе двух сред. Явление разложения светового луча на спектральные составляющие называется *дисперсией*. Каждый источник излучения имеет собственный неповторимый вид спектра, по которому можно определить некоторые его характеристики. *Дифракция* света наблюда-

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

ется, когда луч проходит через апертуру, соизмеримую с длиной его волны. Поскольку результат дифракции зависит от соотношения длины волны и размера апертуры, это явление можно использовать для выделения света некоторой длины волны из светового луча, содержащего несколько волн. На этом принципе работает всем известная дифракционная решетка – разные частотные составляющие светового луча проходя через нее, преломляются под разными углами. Дифракция также описывает результат взаимодействия света с большими частицами вещества, например, с различными примесями в материале оптического волокна.

Некоторые свойства света проявляются при его взаимодействии с веществом. При столкновении фотона с атомами оптического материала его энергия может либо поглощаться этим материалом, либо рассеиваться. *Поглощение* есть передача энергии света атомам объекта, на который он падает. Свет, падая на объект или вещество, может передавать атомам этого вещества либо часть своей энергии, либо всю энергию. Поглощенная энергия света может превратиться в тепло или электрический ток (фотоэлектрический эффект). Атомы некоторых веществ, получив энергию от световой волны, начинают сами излучать свет, длина волны которого больше, чем длина волны падающего света (люминисценция). Если длина волны излучаемого атомами света равна длине волны падающего света, то имеет место явление *рассеяния*. Рассеяние света нельзя путать с диффузией.

Поглощение и рассеяние являются основными причинами затухания света в прозрачных средах, например, в стекле. Иногда в оптике встречается термин "гашение", который может использоваться как синоним слова затухание. Гашение света это снижение его энергии до уровня, при котором он перестает обнаруживаться. Представим теоретическую прозрачную среду, которая состоит только из воздуха. Если луч белого света большой интенсивности проходит через такую среду в темном помещении, то небольшая часть этого света все же будет рассеиваться в ней и луч будет частично виден. Такое рассеяние нельзя объяснить присутствием пыли или других взвешенных частиц, поскольку предполагается, что эти частицы полностью отсутствуют в чистой среде. Следовательно, свет рассеивается на молекулах воздуха, составляющих саму среду. Иначе говоря, свет определенного диапазона длин волн (400 – 700 нм) является видимым благодаря рассеянию на молекулах воздуха, а в другом веществе с другим размером молекул видимым может оказаться несколько другой, смещенный диапазон. Коротковолновый свет (в сторону синего) рассеивается сильнее. Классическим примером молекулярного рассеяния является голубой цвет неба.

Зависимость рассеяния света от частоты показана на рис. 9.2. Пунктирной линией изображено предельное теоретическое соотношение между величиной рассеяния света и длиной волны, характер которого остается неизменным независимо от среды распространения световой волны (Рейли). При малых длинах волн рассеяние велико, а далее потери уменьшаются до некоторого значения длины волны, при котором рассеяние минимально. На больших длинах волн затухание света в волокне снова будет возрастать из-за усиления эффекта рассеяния. Действие механизма рассеяния определяется природой вещества и его молекулярной структурой. Те же механизмы встретим при распространении света в оптическом волокне, основным материалом которого является стекло. При распространении света в стекле рассеяние является причиной ос-

9.1. Передача света по оптическому волокну

лабления световой энергии. Молекулы стекла поглощают фотоны и вновь излучают световую энергию. Это излучение является спонтанным и распространяется в волокне случайным образом. В результате часть световой энергии теряется и на удаленном конце волокна получаем более низкий уровень оптического сигнала.

Теоретическая зависимость указывает, что невозможно изготовить волокно с более низкими потерями, не изменив молекулярную структуру волокна. Вид теоретической кривой зависит от материала, из которого изготовлено волокно, и от способа изготовления волокна. Если изменить молекулярную структуру кремния, являющегося основой волокна, то потери в волокне изменятся.

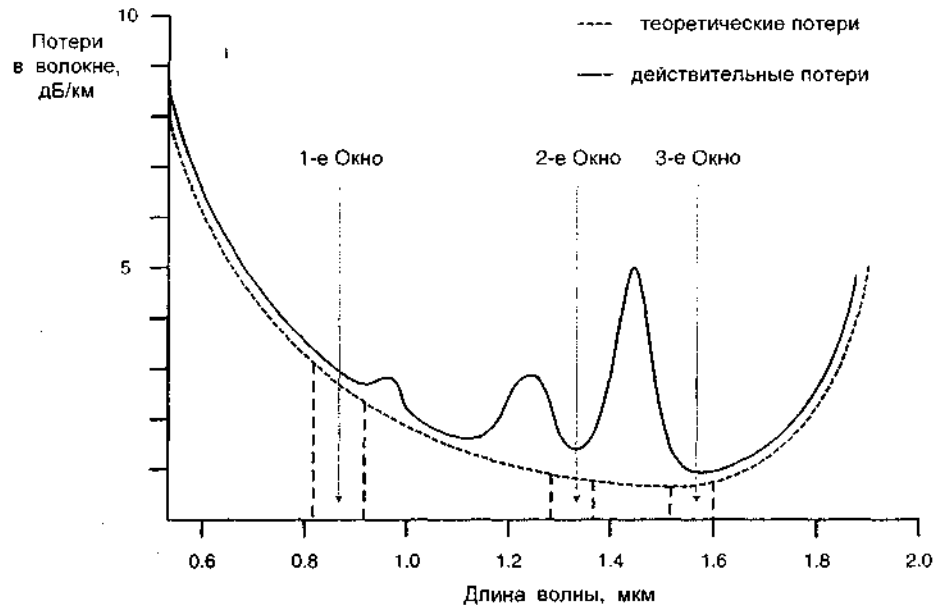


Рис. 9.2. Затухание света в волокне

Изменение молекулярной структуры достигается путем введения в основной материал других веществ (примесей) в малых количествах, а сам процесс добавления примесей называется легированием волокна атомами примеси. Легирование применяется для снижения потерь на отдельных длинах волн в пределах теоретической зависимости. Например, в кремниевое стекло волокна добавляют малое количество атомов галлия. Одновременно легируется и оболочка и сердцевина, поскольку важно сохранить соотношение показателей преломления этих двух структурных элементов волокна. Производимое в настоящее время волокно имеет потери, близкие к теоретическим, но неизбежное отклонение плотности материала на протяжении волокна, возникающее в процессе его производства, приводит к колебанию характеристики рассеяния. Поэтому действительные потери в волокне больше теоретических.

Другая форма потерь света из-за рассеяния обусловлена отклонением поперечного размера сердцевины волокна от средней величины и присутствием различных нерегулярностей на границе между сердцевиной и оболочкой, а

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

также микроизгибов. В процессе прокладки волоконно-оптический кабель может испытывать резкие изгибы или чрезмерное натяжение. На рис. 9.3 показаны некоторые дефекты, появляющиеся в процессе производства или прокладки волокна и результат их влияния. Свет, попадающий на такого рода нерегулярности, рассеивается или выходит в оболочку, что увеличивает затухание оптического сигнала. Поскольку при транспортировке и прокладке волокно подвергается различным воздействиям, то возможны и другие причины повышенного затухания. Так, при строительстве волоконно-оптической системы передачи для стыковки участков волоконного кабеля применяются специальные оптические разъемы и соединители. Потери на некачественно сделанных разъемах могут быть значительными.

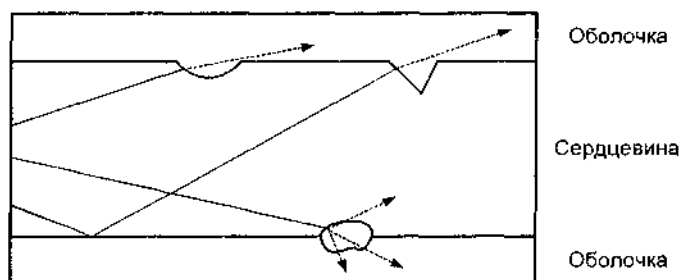


Рис. 9.3. Дефекты волокна

Затухание оптического сигнала вследствие потерь света в волокне в любом случае выражается в уменьшении оптической мощности на выходе волокна и измеряется как отношение в децибелах на километр (дБ/км). Определенное значение потерь относится к конкретной длине волны. Расчет потерь для рабочей длины волны при известной длине кабеля не представляет сложности. Например, волокно, имеющее потери 1,5 дБ/км, при длине 5 км будет вносить затухание, равное $5 \text{ км} \times 1,5 \text{ дБ/км} = 7,5 \text{ дБ}$. При проектировании оптической системы передачи разработчик сталкивается с ограничением по затуханию оптического сигнала, когда потери передачи ослабляют уровень сигнала настолько, что он становится ниже порога достоверного детектирования и необходимо предпринимать специальные меры по восстановлению уровня сигнала. Эти меры могут заключаться в выборе волокна с меньшими потерями, в выборе оптического детектора с более низким порогом чувствительности, в выборе источника света более высокой мощности или в выборе другой рабочей длины волны, на которой затухание сигнала меньше. В некоторых случаях может потребоваться и установка промежуточного усилителя (оптического повторителя).

Затухание света из-за его поглощения увеличивается при уменьшении прозрачности вещества, в котором распространяется свет, поэтому оно менее существенно, чем рассеяние, при передаче световой волны в таких прозрачных средах как воздух или стекло. Загрязнение и присутствие примесей в стеклянной массе, из которой вытягивается оптическое волокно, увеличивает поглощение света в волокне. При поглощении света соударяющиеся с веществом фотоны отдают часть своей энергии атомам этого вещества, но атомы при этом не излучают вторичную энергию, т.е. световая энергия теряется вследствие поглощения фотонов атомами посторонних примесей. На том же рис. 9.2 учте-

9.1. Передача света по оптическому волокну

ны оба механизма затухания света – рассеяние и поглощение. Сплошной линией показана реальная зависимость потерь от длины волны, которая характеризуется более высоким затуханием в целом и несколькими всплесками затухания разной высоты в средней области оптического диапазона. Эти всплески как раз и обусловлены присутствием в стекле посторонних химических элементов. Ионы железа и его химических соединений, например, поглощают свет видимого диапазона. Другой распространенной посторонней примесью является вода, находящаяся в стекле в виде гидроксидных ионов, которые вносят наибольшие потери из показанных на характеристике. В отсутствие примесей реальная кривая стремится к теоретической.

В настоящее время механизм появления нежелательных примесей хорошо изучен и при производстве волокна обеспечивается крайне низкий уровень загрязнения, поэтому выпускаемое оптическое волокно не имеет таких выраженных пиков затухания.

Однако, поскольку в выпускавшемся ранее волокне пики затухания были слишком сильны, оптические системы передачи разрабатывались для работы на тех длинах волн, для которых затухание было менее ощутимо. В результате появилось понятие окон прозрачности, относящееся к тем участкам кривой на рис. 9.2, где потери в волокне минимальны. На рисунке показаны три окна прозрачности: первое на длине волны около 0,85 мкм, второе – около 1,35 мкм, третье – около 1,55 мкм.

9.2. Режимы распространения (моды волокна)

Рассмотрим принципы распространения световых волн в оптическом волноводе, который является закрытой средой распространения. На рис. 9.4,а показан источник света, освещающий с одного торца отрезок оптического волокна. Обратите внимание, что если свет от источника не сфокусирован, его лучи расходятся с очень широким углом, так что большая часть света не попадает в световод и лишь незначительная доля световой энергии источника достигает выхода. На рис. 9.4,б показано, как в световод направляется узкий сфокусированный световой луч. Большая часть энергии источника теперь попадает внутрь и оказывается затем на выходе световода. Очевидно, более эффективной будет передача света от такого источника, который испускает узкий направленный луч.

Важнейшим понятием оптоволоконной техники является мода световода. На том же рис. 9.4 показано, что внутри световода существует несколько возможных путей распространения светового луча внутри световода (в случае, показанном на рисунке их три). Путь распространения зависит от угла ввода света. Эти различные пути светового луча и называются модами. Какой бы ни была направленность излучения источника, некоторая часть лучей будет распространяться прямо вдоль центральной оптической оси световода, являющейся кратчайшим из возможных путей светового луча в волокне. Волна, распространяющаяся по этому пути, не отражается от стенок и называется основной модой световода. Две другие моды, показанные на рисунке, распространяются с отражением. Световая волна, распространяющаяся по каждому из отраженных путей, называется модой распространения. Отраженных путей могут быть сотни и нумеруются они целочисленными значениями (первая, вторая и так далее), называемыми порядком моды.

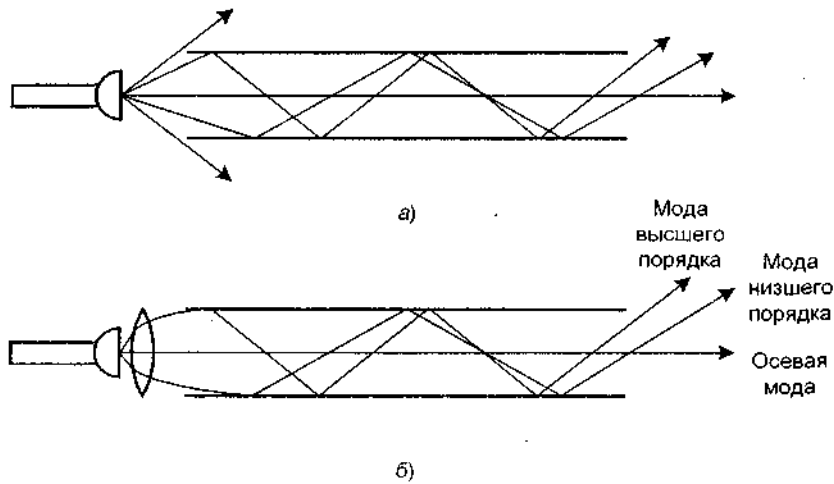


Рис. 9.4. Многомодовый световод

На рис. 9.4,б показаны моды распространения высших и низших порядков. Моды высших порядков соответствуют более длинным путям распространения волны, а моды низших порядков соответствуют более коротким путям. Очевидно, все отраженные пути длиннее прямого пути, поэтому основная мода проходит световод за кратчайшее время. Все моды, включая основную, распространяются в материале волокна с одной скоростью, однако, из-за переотражений модам распространения требуется для прохода через весь световод больше времени, чем основной моде, и, чем выше порядок моды, тем больше время ее распространения. Обратите внимание, что мода является характеристикой не световой волны, а самого световода и определяется его геометрическими параметрами.

Наличие множества мод распространения оказывается нежелательным с точки зрения искажений сигнала в оптическом волокне. Значительного снижения количества мод можно добиться простым уменьшением внутреннего диаметра волокна.

В волокне с уменьшенным внутренним диаметром будет поддерживаться меньше число отраженных мод, как показано на рис. 9.5,а и время распространения моды самого высшего порядка уменьшится. Если уменьшать внутренний диаметр волокна и далее, то в нем сможет распространяться только одна мода –

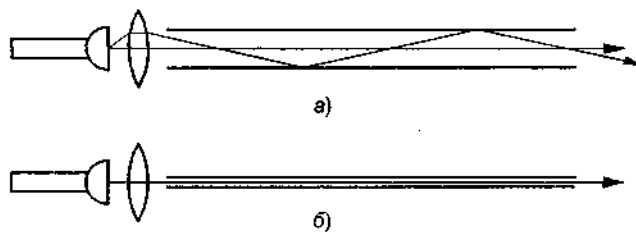


Рис. 9.5. Уменьшение диаметра световода:
а – уменьшение числа мод; б – одномодовое волокно

основная. Волокно, которое поддерживает более одной моды распространения, называется многомодовым, а волокно, поддерживающее только осевую моду, называется одномодовым. Одномодовый режим распространения света в волокне показан на рис. 9.5,б. Недостатком является то, что при слишком маленьком внутреннем диаметре становится трудно направить свет в волокно.

Чтобы получить на выходе волокна как можно большую мощность сигнала, необходимо удержать свет в центральной области волокна, т.е. не дать ему выйти в оболочку. Однако, свет распространяется под разными углами, в том числе и под очень малыми. Угол отсчитывается от продольной оси волокна. При больших углах свет будет выходить в оболочку, а затем некоторая малая часть его может вернуться в сердцевину, но большая часть выйдет за пределы волокна и рассеется во внешней среде. Чтобы этого избежать используют эффект полного внутреннего отражения (ПВО), суть которого состоит в следующем. Если свет из среды с большим показателем преломления падает на границу среды с меньшим показателем преломления, то при некотором критическом угле падения свет полностью отражается от границы, не преломляясь во вторую среду. Если угол падения света больше критического, то будет происходить преломление света, а если угол падения меньше или равен критическому, то будет происходить полное внутреннее отражение. Это явление можно наблюдать, глядя на воду. Видеть дно водоема можно только глядя на воду сверху, так как свет преломляется из воды в воздух под углами, близкими к прямому. Если же смотреть сбоку, то не видно дна, поскольку под этими углами свет не выходит из воды, а целиком отражается от границы с воздухом.

В волокне величина критического угла зависит от соотношения показателей преломления двух сред. Чтобы получить эффект полного внутреннего отражения на границе сердцевины с оболочкой разность показателей преломления оптического материала сердцевины и оболочки необходимо сделать соответствующей конусу ввода данного световода. Лучи света, вводимые в сердцевину волокна в пределах критического угла $\theta_{\text{ПВО}}$ на рис. 9.6, отражаются обратно в сердцевину и оказываются заключенными в сердцевине, распространяясь в ней через световод, а все остальные лучи выходят в оболочку, снижая оптическую мощность на выходе волокна. Выходящие в оболочку лучи, показанные на рис. 9.6 штрих-пунктирной линией, называются несвязанными модами световода. Таким образом, условие эффективного распространения света в волокне состоит в том, что углы отражения мод распространения от оболочки должны быть больше угла полного внутреннего отражения. Для ограничения угла отражения в волокне должен быть предусмотрен специальный механизм контроля угла, под которым свет первоначально вводится в световод.

Одной из главных характеристик оптического волновода является его *числовая апертура* – геометрический параметр световода, определяющий размер конуса ввода в лучей световод или, иначе говоря, степень открытости световода для направляемого на его вход света. Числовой апертурой $\Theta_{\text{НА}}$ называется максимальный угол, под которым световой луч можно ввести в световод. Чем больше числовая апертура, тем шире конус ввода и, тем больше может быть угол, под которым свет вводится в световод и, соответственно, тем больше света от источника попадет в световод. Связь угла распространения света в волокне с числовой апертурой показана на рис. 9.6. Все лучи, входящие из воздуха (показатель преломления около 1) в сердцевину световода (показатель преломления 1,48), сначала преломляются на границе воздуха и сердцевины, а

потом отражаются либо от границы сердцевины с оболочкой (сплошная линия), либо от границы оболочки (пунктирная линия) и идут вдоль оси волокна.

Числовая апертура зависит от диаметра сердцевины и показателей преломления материалов сердцевины и оболочки. С целью повышения эффективности распространения света в волокне числовая апертура делается настолько маленькой, насколько это возможно. В многомодовом волокне это требует существенного ограничения размеров сердцевины. Если диаметр сердцевины будет большим, то свет может войти в волокно и под углами, которые превышают критический угол полного внутреннего отражения на границе с оболочкой, что породит новые моды распространения высших порядков.

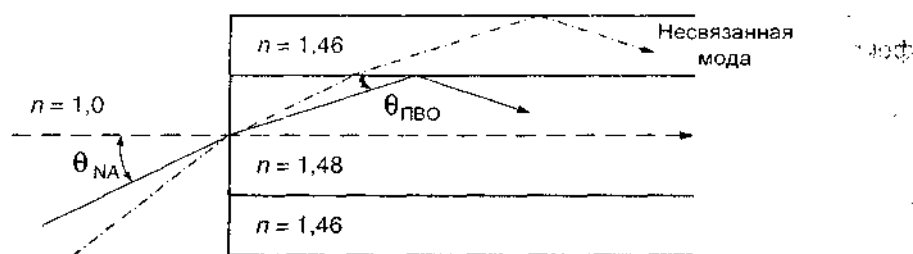


Рис. 9.6. Числовая апертура и угол ПВО

Эти моды, одна из которых показана штрих-пунктирной линией на рис. 9.6, преломляются в оболочку и отражаются от ее внешних границ, в результате чего происходит потеря световой энергии. С другой стороны, существует немало аргументов и в пользу того, чтобы не делать диаметр волокна слишком маленьким. Во-первых, внутренняя механическая упругость волокна с уменьшенным в два-три раза диаметром может быть недостаточной. Во-вторых, отрезки волокна большего диаметра легче соединять друг с другом и с оборудованием. Стоимость стекла, являющегося основным материалом волокна, невелика, поэтому затраты на производство волокна большего диаметра были бы незначительными. Однако, необходимость устранения мод высших порядков является более важным фактором и диктует малые размеры волокна.

Для выходного отверстия световода действительны те же принципы, что и для входного. Числовая апертура определяет конус или угол расходимости светового излучения на выходе волокна аналогично тому, как она определяет угол ввода (угол сходимости) на входе волокна. Максимальная эффективность соединения двух оптических волокон достигается при условии максимальной передачи световой энергии с выходного отверстия одного волокна во входное отверстие другого на их стыке и зависит от степени близости числовых апертур соединяемых волокон. Необходимо также учитывать, что оптический источник (лазер) имеет свой конус расходимости, который должен соответствовать конусу сходимости волокна, а в окончании оптической линии конус сходимости оптического детектора должен соответствовать конусу расходимости волокна.

Понятие числовой апертуры (NA) применимо только к случаю, когда весь свет распространяется в области сердцевины. Однако, на самом деле область распространения света в волокне шире сердцевины, поскольку она включает также и некоторую часть оболочки, не выходя за внешний диаметр волокна. Эту область действительного распространения света называют активной обла-

9.2. Режимы распространения (моды волокна)

стью волокна. Для определения размера активной области введено понятие *диаметр поля мод*. На рис. 9.7 показано соотношение диаметра поля мод, внешнего диаметра волокна и диаметра оболочки. Видно, что значительная часть световой энергии (около 35 %) распространяется в оболочке волокна.

Диаметр поля мод увеличивается с ростом рабочей длины волны и при определенном значении длины волны становится настолько большим, что в одномодовом волокне появятся моды распространения, т.е. одномодовое волокно начнет действовать как обычное многомодовое.

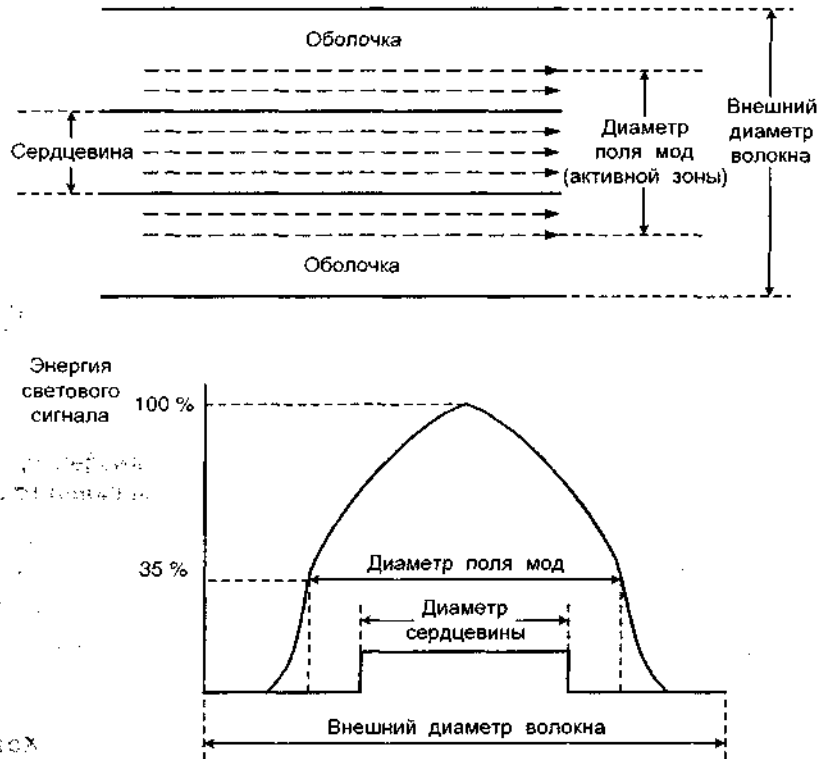


Рис. 9.7. Активная область волокна

Частота, соответствующая этому значению длины волны, называется частотой отсечки и является граничной точкой, ниже которой данное волокно не может использоваться в одномодовом режиме. Частота отсечки является функцией от геометрических параметров и оптических свойств волокна, а именно, от диаметра сердцевины и разности показателей преломления материалов волокна. Поскольку все эти факторы можно контролировать в процессе производства волокна, можно изготовить волокно с той частотой отсечки, которая необходима для системы передачи. При этом одновременно меняется диаметр сердцевины и показатели преломления. Если диаметр волокна несколько увеличить, то на более короткой длине волны оно будет действовать как волокно с увеличенным показателем преломления сердцевины. Рабочая длина волны волокна всегда должна быть меньше длины волны отсечки. Частота отсечки

является наиболее существенной характеристикой, если в волокне распространяются сигналы более чем одной длины волны. В таком режиме волокно используется в системах с частотным мультиплексированием сигналов по длине волны.

9.3. Искажения в оптическом волокне

Рассмотрим различные виды искажений, специфичных для оптических систем передачи. Хотя механизмы этих искажений различаются, общей причиной для всех является одновременное присутствие в оптическом волокне нескольких световых волн. Однако, здесь все возможные формы искажений нужно разделить на две группы. К первой группе относятся искажения, возникающие из-за свойств оптического волновода (модовая дисперсия, волноводная дисперсия). К второй группе относятся искажения, причиной которых является свойства источника излучения (материальная дисперсия). Допустим, что во всех случаях в волокно направляется свет от реального источника, который излучает световые волны в пределах некоторого диапазона, как показано на рис. 9.8.

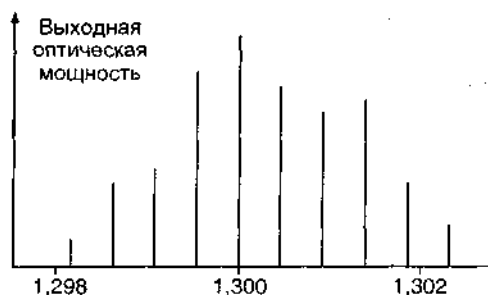


Рис. 9.8. Спектр излучения лазера

Здесь изображен типичный спектр излучения лазера, используемого в волоконно-оптических системах, содержащий основную длину волны с максимальной амплитудой и набор гармоник, группирующихся вокруг нее. Хотя максимальная энергия излучается лазером на центральной длине волны, которая составляет 1,3 мкм, энергия излучения других гармоник тоже достаточно высока. Ширина спектра любого источника оптической системы передачи должна быть ограничена и иметь наименьшую ширину. Идеальным был бы источник, излучающий только на одной длине волны. Реальный лазерный диод имеет ширину спектра порядка 4 нм, тогда как источники на основе LED имеют значительно более широкий спектр, от 40 до 100 нм. В телекоммуникационных системах для передачи по оптическому волокну главным образом используется излучение лазеров невидимого диапазона.

Далее рассмотрим несколько ситуаций. В первом случае предположим, что в оптический волновод направляется свет от импульсного источника, у которого есть только два состояния — включен и выключен. Периодическое включение и выключение источника может быть, например, способом модуляции светового луча информацией, содержащейся либо в длительности включений и выключений, либо в порядке их следования, либо и в том и в другом. Требуется

на выходе световода правильно восстановить из светового луча исходную последовательность импульсов.

Рассмотрим сначала момент времени, когда источник света включен. Предположим, что световые волны распространяются по световоду в многомодовом режиме. При этом волны, которые распространяются как основная мода, придут на выход световода первыми. Оптический приемник (детектор), установленный на удаленном конце световода, зарегистрирует основную моду и выдаст соответствующий электрический импульс "включен". Затем, с различными временными интервалами, остальные моды, которые распространялись по отраженным путям, также придут на удаленный конец световода и будут зарегистрированы детектором, который снова выдаст импульс "включен", хотя этот импульс уже был принят в режиме основной моды. В обратной ситуации, когда источник на вход световода будет выключен, все световые волны перестанут распространяться по световоду. Быстрее всего информация о выключении достигнет выхода по пути основной моды. Однако, детектор все еще будет принимать световой сигнал включения от более медленных мод распространения наивысших порядков, поэтому импульс "включен" не появится в выходном сигнале, пока окончания световода не достигнет последняя, самая медленная мода. В результате на выходе световода произойдет неправильное воспроизведение исходной последовательности импульсов – длительность выходного импульса включения окажется больше, чем длительность входного. В таком случае говорят, что имеет место *модовая дисперсия* или *уширение импульса* (рис. 9.9). Появление модовой дисперсии обусловлено наличием нескольких мод распространения и, поэтому, возможно только в многомодовом режиме. Модовая дисперсия всегда будет присутствовать в многомодовом волокне, независимо от ширины спектра источника излучения.

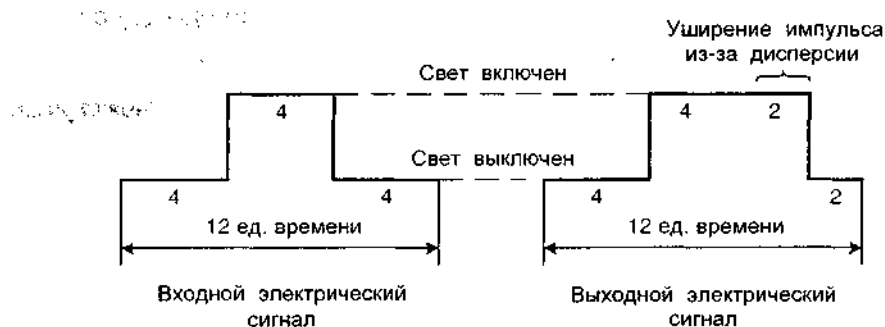


Рис. 9.9. Модовая дисперсия

В технике цифровой передачи наличие импульса (включение) определяется как логическая единица, а отсутствие импульса (выключение) определяется как логический ноль. На интервале логической единицы при передаче в многомодовом режиме возникает модовая дисперсия. Из-за уширения импульса свет будет продолжать передаваться и на интервале следующего логического нуля, поэтому длительность импульса в выходном электрическом сигнале оптического детектора не будет соответствовать длительности импульса в электрическом сигнале на входе волокна. Заметим, что на всем протяжении логической

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

единицы, эффект уширения импульса не заметен, хотя он также присутствует. Уширение является лишь следствием разности времен распространения мод и никак не связано с интенсивностью света.

Еще один вид искажений, обусловленный свойствами оптического волокна, называется *волноводной дисперсией*. Как известно, световая энергия определенной длины волны перемещается в различных средах с разными скоростями, поскольку показатели преломления разных сред различны. Допустим, что в волокне распространяется только одна мода. Поскольку в одномодовом волокне некоторая часть света распространяется через материал оболочки, и, поскольку показатели преломления оболочки и сердцевины различаются, то даже если единственный сигнал некоторой длины волны находится в световоде, дисперсия в волокне будет присутствовать из-за разности времен распространения в оболочке и сердцевине.

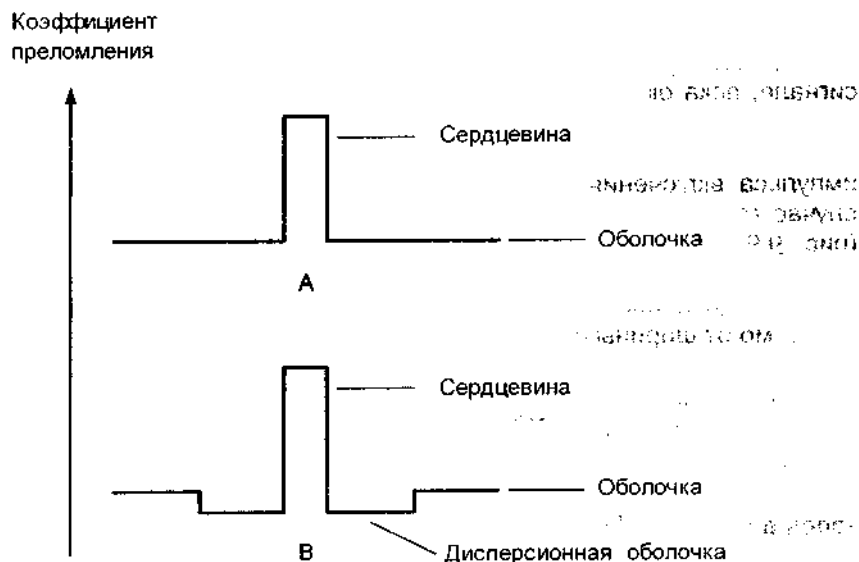


Рис. 9.10. Волокно со смещенной дисперсией

Результатом будет также уширение выходного импульса. Степень проявления волноводной дисперсии зависит от структуры волокна и длины волны моды. В волокне определенной структуры волноводная дисперсия может быть сильнее выражена на одной длине волны, чем на другой. На некоторой длине волны волноводная дисперсия может быть равна нулю. Меняя геометрические параметры волокна, а именно, активной области, в которой распространяется свет, можно сместить точку минимальной (или нулевой) дисперсии так, чтобы она приходилась на нужную рабочую длину волны или на рабочий диапазон длин волн. Волокно со смещенной дисперсией показано на рис. 9.10. Смещение здесь достигается путем изменения показателя преломления материала оболочки.

Другая форма искажения в одномодовом волокне связана с еще одним оптическим явлением, которое выражается в том, что свет разных длин волн перемещается с разными скоростями даже в среде с постоянным показателем

преломления. Напомним, что любая мода, не связана с какой-либо конкретной длиной волны. Она только описывает путь прохождения волны по световоду, т.е. относится ко всем длинам волн. Поэтому, несмотря на то, что показатель преломления в пределах сердцевины не меняется, скорости распространения одной и той же моды в сердцевине различны для разных длин волн. Даже если волокно поддерживает только одну моду распространения, все гармоники излучения лазера попадут в волокно, и будут распространяться в нем с различными скоростями из-за различия их длин волн. Следовательно, отдельные гармоники лазера пройдут световод за разные промежутки времени и на выходе волокна будет наблюдаться уширение входного импульса. Это явление называется *материальной дисперсией*. Заметим также, что оптические источники света не являются абсолютно стабильными. Источник, предназначенный для генерации светового импульса с длиной волны 1300 нм, время от времени может испускать световые импульсы и других длин волн. Как и волноводная дисперсия, материальная дисперсия проявляется по-разному на разных длинах волн и, меняя коэффициент преломления материала оболочки, ее можно минимизировать. Также можно выбрать рабочие длины волн, соответствующие минимальной материальной дисперсии для данного волокна. Проявление материальной дисперсии не связано со свойствами волновода, а объясняется только свойствами источника.

Рассмотрим другой вид искажений, являющийся следствием описанных выше эффектов. При низких скоростях передачи информации (не путать со скоростями распространения света), когда длительность передаваемого импульса велика, эффект уширения выходного импульса по сравнению с входным импульсом, можно рассматривать как чисто теоретический и пренебрежимо малый – увеличение длительности импульса включения света в этом случае будет незначительным. Но в волоконно-оптических системах информация передается на гораздо более высоких скоростях. Например, при скоростях около 90 Мбит/с период, в течение которого источник света включен, составляет около 10 нс. Хотя такая скорость вовсе не является для современных систем высокой, искажение импульса, составляет значительный процент от нормального периода импульса. Каждый бит информации в цифровой системе передается отдельным импульсом. Таким образом, скорость передачи 90 Мбит/с означает, что по волокну передается около 90 миллионов световых импульсов в секунду (на самом деле чуть больше, поскольку 1 Кбит = 2^{10} бит = 1024 бит). Если импульсами передаются только логические единицы, а на периоды логических нулей лазер выключается, то это число уменьшается в среднем вдвое. Из-за модовой дисперсии импульсы на выходе волокна удлиняются (размываются) и некоторые из них вторгаются на соседние интервалы логических нулей, в которых импульсы должны отсутствовать. Это усложняет процесс детектирования импульсов, который должен определить, присутствует импульс на данном временном интервале или нет. Явление расширения импульса на соседний временной интервал называется *межсимвольной интерференцией*. Механизм появления межсимвольной интерференции проиллюстрирован на рис. 9.11. Интерференция может привести к серьезным ошибкам детектирования передаваемой цифровой информации.

Если передаваемый оптический сигнал является аналоговым, то шум и искажения будут сходны с теми, что присутствуют в других аналоговых широкополосных системах передачи. Это в основном относится к оптическому терми-

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

нальному оборудованию, но некоторые эффекты в оптическом волокне оказывают влияние на всю полосу частот системы. Скорость изменения интенсивности аналогового светового сигнала не высока, поэтому в аналоговых системах межсимвольная интерференция не является существенным эффектом. Если передаваемые сигналы являются цифровыми, уширение импульса вследствие дисперсии и, как следствие, межсимвольную интерференцию, необходимо учитывать, особенно на высоких скоростях передачи, при которых длительность импульса очень мала.

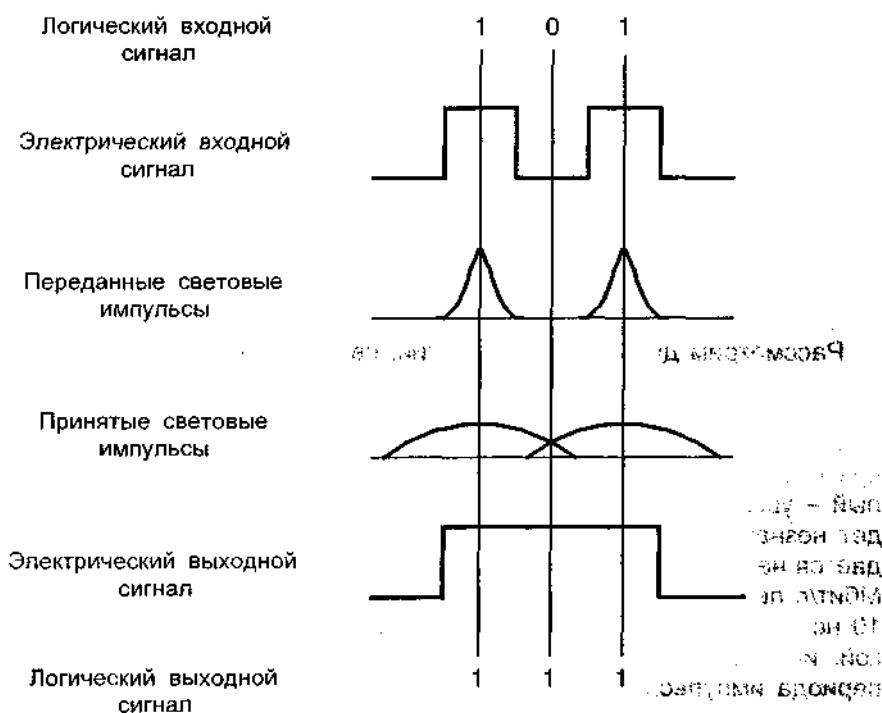


Рис. 9.11. Межсимвольная интерференция

На рис. 9.12 показан еще один механизм возникновения искажений в оптическом волокне, объясняемый различными механическими нерегулярностями на внутренней поверхности световода (неровностями, зазубринами, впадинами). Те лучи света, которые ранее распространялись в соответствии с модами световода, теперь в случайном порядке отражаются от нерегулярностей, рассеиваясь под разными углами и порождая новые моды. Прежние моды (в отсутствие нерегулярностей) сохраняются и волны продолжают распространяться по ним, но появляется и много новых мод, которые проходят световод за большее время, что приводит к увеличению дисперсии. Часть новых мод может описывать даже обратные пути распространения волны, назад, к входному отверстию световода, что снижает выходную мощность света.

Существуют методы борьбы с описанными формами искажений. Так, при уменьшении диаметра волокна разность времен распространения основной моды и отраженной моды высшего порядка тоже уменьшается, что приведет к

9.3. Искажения в оптическом волокне

снижению модовой дисперсии, а следовательно, уширение импульса будет менее ощутимо. В одномодовом волокне модовая дисперсия будет устранена полностью и уширение импульса будет минимизировано. Смещение дисперсии в волокне путем изменения показателя преломления оболочки является также эффективным способом устранения искажений такого типа.

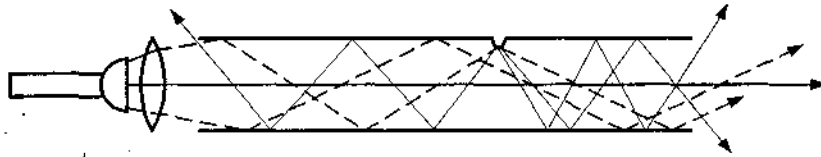


Рис. 9.12. Влияние механических нерегулярностей

Для уменьшения материальной дисперсии используются более качественные источники излучения с узким спектром. Кроме того, можно использовать другую рабочую длину волны, на которой дисперсия будет минимальной. В цифровой технике существуют свои методы борьбы с межсимвольной интерференцией.

9.4. Типы и характеристики оптических волокон

Одним из способов классификации световодов является классификация по материалу, из которого они выполнены. Существуют множество типов стеклянного и пластикового волокна. Большинство волокон, используемых в телекоммуникационных системах, изготавливается из кварцевого стекла. Размеры оптических волокон очень малы. Внешний диаметр волокна может составлять около 125 мкм. Хотя стекло как материал имеет менее высокую стоимость, чем металлический проводник, процесс производства волокна более трудоемок и поэтому стоимость волокна оказывается в среднем выше стоимости металлических кабелей.

Оптическое волокно является более хрупким изделием, чем металлический кабель. Собственная внутренняя прочность стекла зависит от наличия в нем химических и физических дефектов, вызывающих напряжение и деформацию стекла. Трещины и другие повреждения в волокне могут образовываться при его производстве, транспортировке, обработке, прокладке и даже при воздействии атмосферы. Волокно, в котором образовалась трещина, будет разрушаться и далее вследствие механического напряжения в нем. Повышенная влажность, натяжение и химические реакции могут ускорить разрушение волокна. Следовательно, в целом оптическое волокно в большей степени чувствительно к дефектам, чем металлический проводник. Влияние поверхностного износа металлического проводника на качество передачи в нем пренебрежимо мало по сравнению с влиянием износа на оптическое волокно.

Другим признаком классификации оптических волокон является профиль показателя преломления. Напомним, что когда свет переходит из среды с одним показателем преломления в среду с другим показателем преломления, его скорость меняется. Вследствие этого луч света отклоняется от первоначального направления, т.е. преломляется. Показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}$$

где c – скорость света в среде, v – скорость света в вакууме.

Чем больше показатель преломления той среды, в которую входит свет, тем большее отклонение испытывает в ней луч и тем меньше становится скорость его распространения в этой среде. Таким образом, показатель преломления вакуума по определению равен 1. Показатели преломления некоторых других сред приведены ниже.

Показатель преломления, n	
Воздух.....	1,003
Вода.....	1,33
Кварц.....	1,43
Стекло.....	1,5
Алмаз.....	2,0
Кремний.....	3,4
Галлий.....	3,6

Профилем показателя преломления называется кривая изменения показателя преломления на поперечном срезе волокна. Различают волокно со ступенчатым и плавным (градиентным) профилем. Оба типа волокна созданы на основе принципа оптического преломления. В одномодовом и многомодовом волокне со ступенчатым профилем свет заключен в сердцевине благодаря эффекту полного внутреннего отражения света на границе сердцевина-оболочка.

В градиентном волокне с плавным профилем свет удерживается в волокне благодаря отражению, происходящему из-за плавного изменения показателя преломления по радиусу сердцевины. Волокно со ступенчатым профилем имеет сердцевину (центральную массу), изготовленную из стекла с одним показателем преломления, и внешнюю оболочку, которая изготовлена также из стекла, но с другим показателем преломления.

Волокно со ступенчатым профилем показано на рис. 9.13. Видно, что показатель преломления на границе двух стеклянных материалов меняется резко (ступенчато). Значения показателей преломления, данные на рисунке, выбраны произвольно. В процессе производства значение показателей преломления сердцевины и оболочки можно регулировать путем легирования и сделать профиль таким, каким нужно. Волокно со ступенчатым профилем показателя преломления может быть одномодовым или многомодовым. Из-за значительной модовой дисперсии многомодовое волокно со ступенчатым профилем реже используют в телекоммуникационных системах. В одномодовом волокне диаметр сердцевины уменьшен до того значения, при котором в нем сможет распространяться только одна отраженная мода. Этот способ является одним из возможных способов устранения модовой дисперсии.

Существует и другая мера, позволяющая избавиться от модовой дисперсии. Она касается изменения структуры волокна и основана на механизме преломления, а не отражения света. Показатель преломления внутренней стеклянной массы волокна можно сделать любым. Можно, например, изготовить волокно, у которого показатель преломления сердцевины в поперечном сечении будет не постоянным, а плавно меняющимся по слоям структуры.

9.4. Типы и характеристики оптических волокон

Рис. 9.13

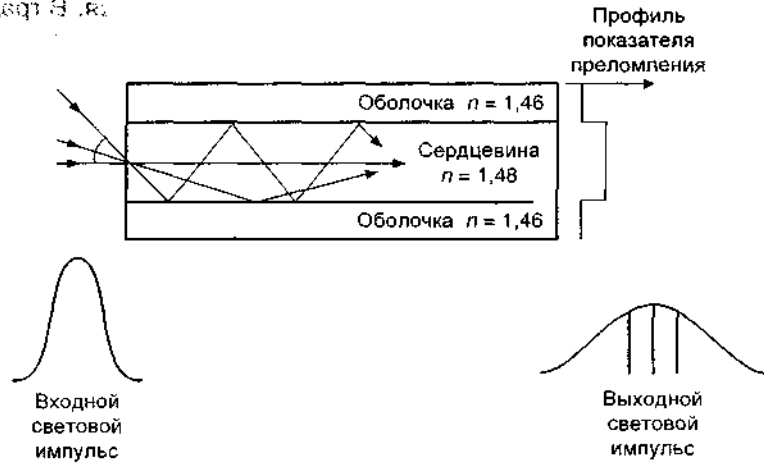


Рис. 9.13. Волокно со ступенчатым профилем

Сердцевина такого волокна представляет собой серию вложенных концентрических слоев, каждый из которых имеет показатель преломления несколько отличный от показателя преломления соседнего слоя. По мере увеличения радиуса слоя от оси волокна к его внешней границе показатель преломления убывает. Такое волокно называется градиентным. На рис. 9.14 показано распространение света в градиентном волокне.

Действие механизма преломления света в сердцевине градиентного волокна показано на рис. 9.15. Свет, вводимый под некоторым углом в градиентное волокно, проходит через несколько слоев сердцевины, в каждом из которых его скорость изменяется. Быстрее всего свет распространяется в стекле с наименьшим показателем преломления, т.е. в той области, которая находится дальше от оптической оси волокна. Поэтому, во-первых, свет преломляется назад к оси волокна, а, во-вторых, разность времен распространения света по

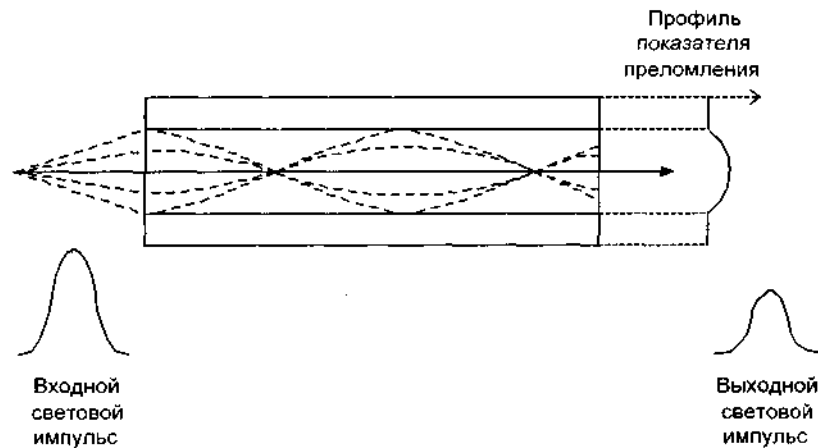


Рис. 9.14. Волокно с градиентным профилем

осевому пути и по преломленному пути значительно снижается. В градиентном волокне тоже поддерживается несколько мод распространения и длины путей распространения различны так же, как в многомодовом волокне со ступенчатым профилем. Однако, в градиентном волокне время распространения моды при увеличении ее длины пути снижается за счет увеличения скорости при преломлении. Это снижение пропорционально длине моды, поэтому почти все моды приходят на выход волокна одновременно. В отличие от ступенчатого волокна в градиентном волокне граничная линия между оболочкой и сердцевинной отсутствует как таковая, а функцию ограничения области распространения света выполняет сама сердцевина. Градиентное волокно требует строгого контроля в процессе его производства. Внешний диаметр обычного градиентного волокна составляет около 125 мкм, а диаметр его сердцевины – около 50 мкм.

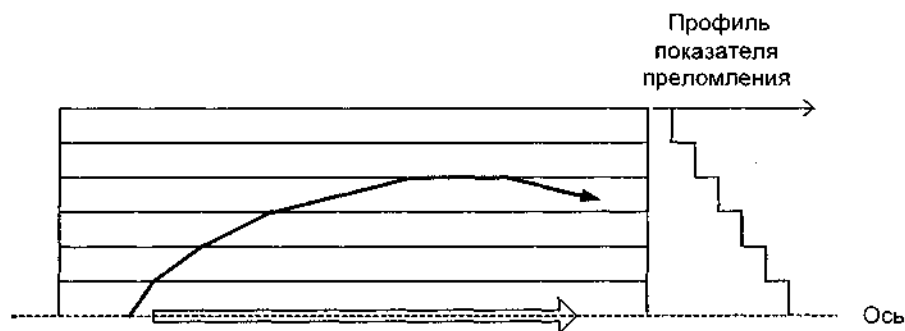


Рис. 9.15. Принцип действия градиентного волокна

Сравним два типа волокна с точки зрения их качественных параметров. И в градиентном волокне, которое практически всегда является многомодовым, и в одномодовом волокне со ступенчатым профилем модовая дисперсия снижена, но в разной степени. Хотя ступенчатое волокно с большим диаметром сердцевины не используется в больших телекоммуникационных системах независимо, оно применяется в других случаях, когда расстояние передачи или скорость передачи или то и другое ограничено. Как и в случае цифровой передачи на несущей частоте в кабельной системе, где средой передачи является металлический проводник, в волоконно-оптической системе передачи искажается длительность импульса, определяемая временем переключения источника (моментами подъемов и спадов импульса), но механизм искажения импульса в оптической системе совершенно иной.

В табл. 9.1 представлена сравнительная характеристика все трех типов волокон – градиентного, ступенчатого многомодового и ступенчатого одномодового.

Основными характеристиками оптического волокна являются рабочая длина волны, полоса пропускания, потери передачи, дальность передачи, дисперсия и размеры волокна. Приблизительные характеристики различных волокон даны в табл. 9.2.

Внешний диаметр

В настоящее время производятся кварцевые волокна с диаметром сердцевины 50 и 62,5 мкм и внешним диаметром оболочки – 125 мкм, а также полимерные волокна с диаметром сердцевины 100 мкм и диаметром оболочки 140 мкм.

9.4. Типы и характеристики оптических волокон

Таблица 9.1

Сравнение волокна различных типов

Тип волокна	Преимущества	Недостатки
Многомодовое волокно со ступенчатым профилем (большого диаметра)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Упрощается соединение и сращивание волокон 2. Из-за большой числовой апертуры упрощается введение света в волокно и его получение на выходе волокна 	Значительная модовая дисперсия и потери света в оболочке волокна (может быть допустимо только при малой длине волоконной линии или низкой скорости передачи)
Многомодовое волокно с градиентным профилем	<ol style="list-style-type: none"> 1. Упрощается соединение и сращивание волокон 2. Из-за большой числовой апертуры упрощается введение света в волокно и его получение на выходе волокна 	Модовая дисперсия накладывает некоторые ограничения на рабочую полосу волокна, что ограничивает скорость передачи данных. Обычно используются волокна с полосой от 600 до 2000 МГц на километр
Одномодовое волокно со ступенчатым профилем (малого диаметра)	Из-за слабой модовой дисперсии или даже ее полного отсутствия предоставляют очень широкую рабочую полосу и позволяют передавать информацию с очень большой скоростью при довольно простой структуре	<ol style="list-style-type: none"> 1. Усложняется соединение и сращивание волокон 2. Из-за малой числовой апертуры усложняется введение света в волокно и его получение на выходе волокна

Таблица 9.2

Характеристики оптических волокон

Длина волны, нм	Тип волокна	Дисперсия, пс/нм·км	Полоса, МГц/км	Потери, дБ/км	Дальность передачи, км
850	Многомодовое	18,0	250 – 600	3,0 – 4,0	2 – 5
1310	Многомодовое	15,2	800 – 1200	0,7 – 1,0	<10
1310	Одномодовое	3,5	5000 – 7000	0,35 – 0,45	10 – 50
1550	Одномодовое	1,9	>10000	0,15 – 0,22	>50

Волокно с сердцевиной 62,5 мкм обеспечивает примерно на 2 дБ меньшие потери на вводе излучения в волокно за счет большей апертуры, а волокно с сердцевиной 50 мкм имеет меньшую модовую дисперсию. Многомодовые волокна имеют больший диаметр, чем одномодовые, поэтому они более удобны при монтаже.

Длина волны

Рабочая длина волны волокна, как уже было сказано, определяется окнами прозрачности кварцевых волокон. В настоящее время производится волокно на длины волн 850 нм, 1310 нм и 1550 нм. Волокно, рассчитанное на длину волны 850 нм, является многомодовым, волокно на 1550 нм – одномодовым, а волокно на 1310 нм – многомодовым или одномодовым. Волокно на 850 нм популярно из-за его низкой стоимости, а также низкой стоимости оптического приемопередающего оборудования, работающего на этой длине волны.

Дисперсия и уширение импульса

Дисперсия в волокне должна быть минимальной, так как использование волокна с высокой дисперсией приводит к уменьшению полосы пропускания и в любом случае ведет к недостаточной линейности оптической передающей системы. Дисперсия зависит от соотношения длины отрезка волокна и рабочей длины волны, определяется она по следующей формуле:

$$d = \frac{\Delta t}{\lambda L},$$

где Δt – уширение импульса (в секундах), λ – рабочая длина волны, L – длина волокна. Дисперсия накладывает ограничение на дальность передачи и на верхнюю частоту передаваемых сигналов. Если при распространении света по многомодовому волокну как правило преобладает модовая дисперсия, то одномодовому волокну присущи только материальная и волноводная дисперсии. В одномодовом волокне на длине волны 1310 или 1550 нм материальная и волноводная дисперсии компенсируют друг друга, что обеспечивает наибольшую пропускную способность при максимальной дальности передачи.

Полоса пропускания

Полоса пропускания волокна зависит от его дисперсии, длины волны и протяженности отрезка волокна. Так как дисперсия приводит к уширению импульса при распространении света по волокну, то полоса пропускания будет тем меньше, чем больше дисперсия и длина волокна. По определению полоса пропускания – это величина, обратная величине уширения импульса, измеренного при прохождении импульса по оптическому волокну длиной в 1 км. Поэтому полосе пропускания волокна измеряют в герцах, отнесенных к единице измерения длины (например, МГц/км). Самым высоким качеством с точки зрения ширины полосы обладает одномодовое волокно с рабочей длиной волны 1550 нм, а самым низким качеством – волокно с рабочей длиной волны 850 нм.

Потери передачи и дальность передачи

Потери в волокне, прежде всего, определяются рабочей длиной волны. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без усиления. Лучшее волокно фирмы Sumitomo (Япония) на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км, а фторцирконовое волокно фирмы Corning (США) имеет теоретический предел потерь около 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Для много-

модовых линий связи дальность и скорость передачи обычно не превышают соответственно 2 км и 100 Мбит/с. Для одномодовых линий связи реально достижимы дальность передачи 90 – 100 км при скорости передачи до 10 Гбит/с.

9.5. Структура волоконно-оптического кабеля

Волоконно-оптический кабель (ВОК) по многим показателям является выгодной альтернативой коаксиальному. В частности, он имеет очень широкую полосу частот и не нуждается в экранировании от внешних электромагнитных излучений. Однако, хотя оптический кабель и лишен многих недостатков коаксиального кабеля, ему также свойственны недостатки, в основном механического характера. Например, существуют некоторые трудности при прокладке и, особенно, при разделке кабельных разъемов. Прокладка оптического кабеля требует привлечения профессионального высококвалифицированного персонала, что увеличивает затраты на строительство сети. Для монтажа оптических волокон требуется высокоточное, а потому дорогое, оборудование. Высокая стоимость оптического кабеля объясняется его более сложной механической структурой и повышенными требованиями к точности его изготовления.

Волоконно-оптический кабель содержит несколько оптических волокон для повышения пропускной способности оптической линии передачи. Основной задачей структуры волоконно-оптического кабеля является защита относительно хрупких стеклянных волокон от механических повреждений и прямого влияния влаги и химических элементов. Кроме того, кабель должен обеспечивать достаточную эластичность отдельных волокон, чтобы сохранить возможность нормальной обработки при прокладке кабеля, и достаточную прочность для защиты от длительного воздействия окружающей среды. Многие материалы и технологии, разработанные для производства металлических кабелей, с успехом применяются и для изготовления волоконно-оптических кабелей. Главное отличие в технологии производства оптических кабелей заключается в необходимости повышенной степени защиты волокон от любых напряжений, которые могут возникать в структуре кабеля.

По условиям эксплуатации кабели разделяют на кабели для прокладки магистральных и транспортных линий передачи и кабели, предназначенные для создания распределительных сетей и прокладки внутри зданий. Эти два типа ВОК различаются весом, строительной длиной, степенью защиты и емкостью. Магистральный кабель и транспортный прокладывается в колодцах кабельных коммуникаций, в грунте, на опорах вдоль линий электропередач, имеет повышенную защиту от внешних воздействий и строительную длину более двух километров. В зависимости от необходимой протяженности оптического участка применяется кабель более или менее высокого качества.

Для строительства магистральных и транспортных линий используется кабель с одномодовыми волокнами большой пропускной способности (сотни Гбит/с) и очень малым затуханием – менее 0,2 дБ/км. В распределительных сетях используется и многомодовые, и одномодовые кабели, хотя первые значительно чаще ввиду того, что их стоимость относительно невелика, а качество вполне приемлемо для строительства магистральных ответвлений, длина которых ограничена. В тех случаях, когда возможно применение обоих типов кабелей, следует принимать решение исходя из общей стоимости строительства кабельной системы.

По способу сборки волокон различают кабели с центральной скруткой (с несущим стержнем или без него), кабели с профильным сердечником и ленточные кабели. Производится множество вариантов этих трех базовых структур, что в сочетании большим ассортиментом оптических коннекторов позволяет выбрать кабель, который наилучшим образом удовлетворяет всем техническим и экономическим условиям проекта. Структура кабеля в целом укрепляется внешней стенкой, которая обеспечивает механическую прочность при протягивании и прокладке кабеля и устойчивость к образованию выпуклостей и продольных изгибов. Внешняя стенка образует достаточно толстую и плотную конструкцию и может обеспечивать очень высокую степень защиты с помощью влагонепроницаемых экранов, нескольких прессованных оболочек и армирующих лент.

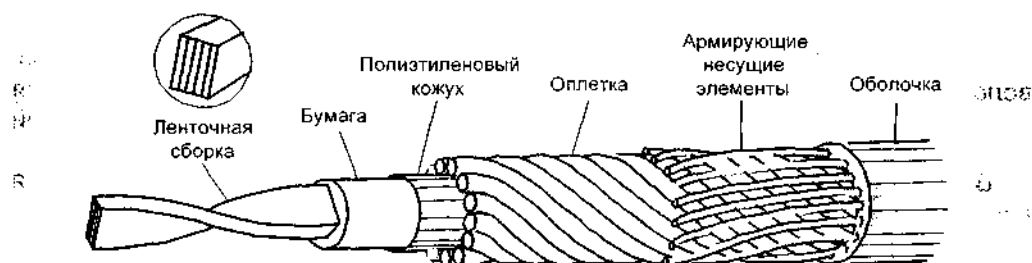


Рис. 9.16. Ленточный кабель

Ленточная структура содержит в центре защитную полость в виде трубки, проходящей через всю длину кабеля. Эта центральная область кабеля или сердцевина выполняет функцию кабельного канала. В процессе производства такого кабеля отдельные волокна не втягивают внутрь готовой структуры, а формируют кабель вокруг находящихся в центре волокон. Структура ленточного кабеля изображена на рис. 9.16.

Отметим, что все волокна расположены в центральной области кабеля. Отдельные волокна уложены параллельно друг другу и затем упакованы в плоскую ленту, которая становится единым элементом структуры кабеля. Лента может содержать не менее двенадцати волокон. Несколько таких лент собираются в цельную механическую конструкцию. Поэтому в одном кабеле количество волокон может быть очень велико. Ленточная сборка спирально закручена по всей длине кабеля во избежание возникновения в ней механического напряжения при увеличении длины волокон. Полость сердцевины кабеля, в которой заключена лента, обычно заполняют каким-либо гелеобразным влагонепроницаемым составом.

Замечательная особенность кабелей этого типа состоит в том, что при их соединении используется метод сращивания целых лент, а не отдельных волокон двух кабелей.

Таким образом, сращивание кабелей осуществляется одной операцией с помощью кристалла с нанесенными на нем канавками. На рис. 9.17 показан способ соединения двух ленточных кабелей. В целом, ленточные кабели дороги в производстве, и, поэтому их использование ограничено магистральными маршрутами с высокой плотностью трафика, соединяющими крупные населенные пункты и требующими большого количества волокон.

9.5. Структура волоконно-оптического кабеля

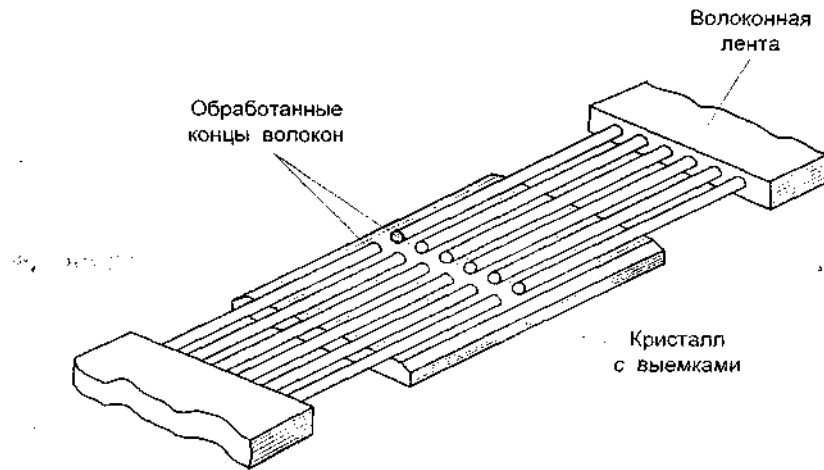


Рис. 9.17. Соединение ленточных кабелей

На рис. 9.18 показана структура с центральной скруткой и несущим стержнем. Эта структура оптического кабеля более сходна с обыкновенным многожильным кабелем. В ней волокна отделены друг от друга на всем протяжении кабеля, даже если они сплетены в скрутку. Несущий стержень находится в центре структуры и может быть сделан из различных прочных и, в то же время, гибких материалов. Все оптические волокна группируются вокруг несущего элемента в виде скрутки.

Несмотря на название, несущий элемент обычно не несет всей или даже большей части механической нагрузки на кабель, но служит в действительности для предотвращения выпуклостей и продольных изгибов волокон или самого кабеля при его сгибании. Некоторые модификации этого типа кабеля не имеют центрального несущего элемента. Вместо этого волокна отдельно покрываются защитным слоем и буферизируются, а затем группируются в виде кисти (кластера) вдоль продольной оси кабеля, как показано на рис. 9.19.

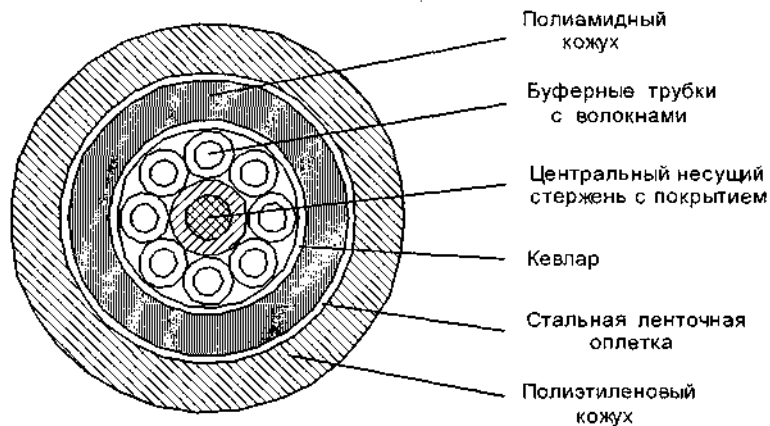


Рис. 9.18. Структура с несущим стержнем

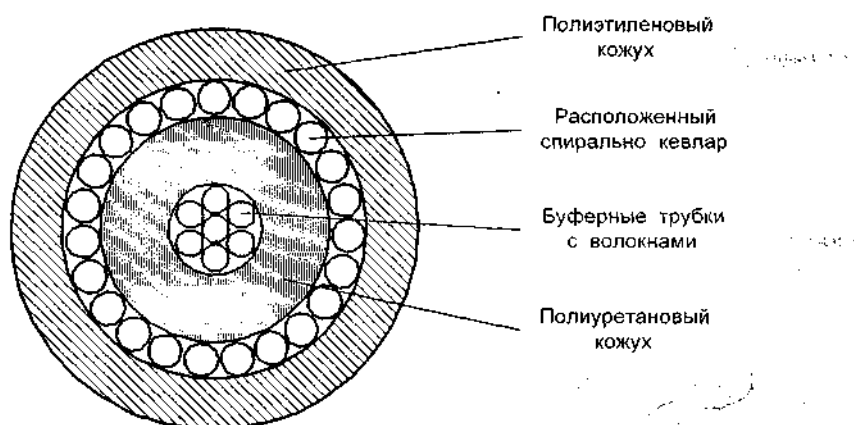


Рис. 9.19. Структура с центральной скруткой

Внешняя стенка такого кабеля может выполнять роль несущей конструкции, включая металлический водоотталкивающий экран, несколько прессованных кожухов и армирующую ленту.

Структура с профильным сердечником показана на рис. 9.20. В ней в качестве поддерживающего элемента используется пластиковый сердечник большого размера, на внешней поверхности которого сделаны продольные канавки или выемки для укладки оптических волокон. Сердечник может либо содержать, либо не содержать отдельный встроенный несущий стержень. Волокна расположены в канавках достаточно свободно, поэтому они не испытывают напряжения при увеличении длины. По той же причине в кабеле этого типа не применяется буферизация отдельных волокон.

Волокно-оптический кабель благодаря своим физическим свойствам превосходит по многим показателям коаксиальный кабель. Так как стекло является диэлектриком, проблема гальванической развязки отпадает сама собой. Важное свойство оптического волокна – это его стойкость к неблагоприятным воздействиям внешней среды, повышающая его срок службы в несколько раз по сравнению с коаксиальным кабелем.

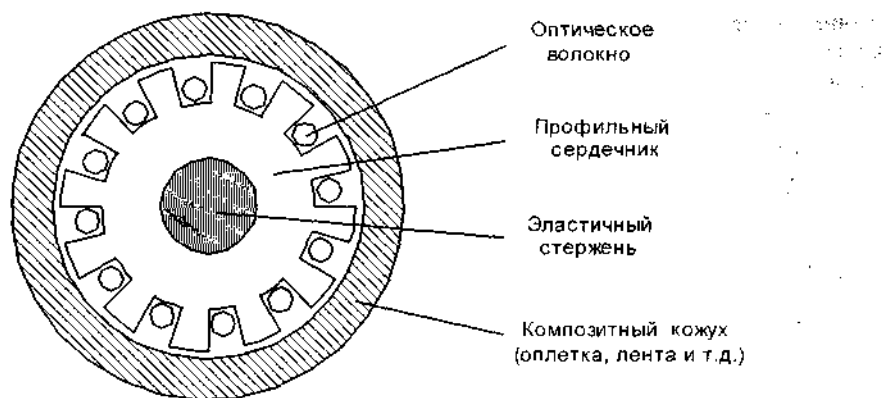


Рис. 9.20. Структура с профильным сердечником

9.5. Структура волоконно-оптического кабеля

Так, средний срок службы волокна, в течение которого оно сохраняет свои свойства в заданных пределах, превышает 25 лет, что позволяет сильно снизить затраты на обслуживание кабельной сети на основе ВОК. Малый диаметр волокна позволяет производить кабель огромной пропускной способности с очень большим числом волокон.

Оптические кабели могут содержать более сотни волокон как одномодовых, так и многомодовых. Стандартные кабели включают следующее количество волокон: 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 72, 80, 120, 144. Широкополосность каждого волокна, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей (10^{14} Гц) обеспечивает скорость передачи в кабеле порядка сотен гигабит в секунду. Это означает, что с помощью одного оптического кабеля можно передать одновременно до десяти миллионов телефонных разговоров и миллион телевизионных сигналов. Не составляет труда организовать двунаправленную передачу по ВОК, поскольку световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга в обоих направлениях. Пропускную способность можно повысить еще в два раза за счет того, что в волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций. На сегодняшний день возможности ВОК по передаче информации превышают имеющиеся потребности в передаче, т.е. предел пропускной способности ВОК далеко не исчерпан. Хотя в случае повреждения или обрыва оптического кабеля затраты на его восстановление будут выше, чем с коаксиальным кабелем, все прочие преимущества от применения ВОК настолько значительны, что эти линии будут все шире использоваться для построения сетей передачи.

9.6. Соединение оптических волокон

Принципы соединения отрезков волоконно-оптического кабеля радикально отличаются от принципов соединения отрезков коаксиального кабеля. Особенности оптических соединений объясняются такими свойствами волокна как хрупкость, малые размеры и вес. Это делает соединение волокон более сложной задачей, чем аналогичные действия с коаксиальными кабелями, и является убедительным аргументом в пользу сокращения, насколько это возможно, необходимого числа соединений в оптической линии передачи. Прокладка сверхдлинных кабельных участков без соединений стала возможна благодаря преодолению технологических ограничений на длину волокна, которое можно вытянуть из стеклянной массы. Сейчас прокладка оптического участка протяженностью в несколько километров является обычной практикой. Однако, каким бы длинным ни был кабельный участок, на его протяжении может потребоваться включение различных оптических приборов, поэтому соединение волокон разных кабелей неизбежно. Даже если на линии не устанавливаются оптические ответвители и усилители, вход и выход отрезка оптического кабеля необходимо соединить с приемно-передающей аппаратурой. Эволюция любой новой технологии со временем упрощает многие аспекты ее практического применения. Появляются новые методики, совершенствуется технология производства и повышается качество, а стоимость падает. Это относится и к применению волоконно-оптической технологии в системах кабельного телевидения. Аргумент против использования соединений на оптическом участке уже не является таким убедительным, как ранее. В настоящее время соединение кабеля является, технически и экономически обоснованным решением при строительстве ка-

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

бельных систем, обеспечивающим удовлетворительное качество передачи, и уже не расценивается как средство, к которому можно прибегнуть только в крайнем случае.

Существует два вида соединений оптических волокон, различающихся по функциональности точек соединения. В одних точках требуется возможность разъёмного соединения, а в других точках допускается постоянное (неразъёмное) соединение.

Для разъёмного оптического соединения применяются механические соединители или коннекторы. Коннектор должен обеспечивать надёжное подключение оптического кабеля к розетке наиболее простым образом. В сфере кабельного телевидения наиболее распространены коннекторы типов FC и SC с резьбовой фиксацией. В последнее время все большую популярность приобретают разъёмы с фиксацией типа Push-Pull (на защёлке), которые обеспечивают более удобное подключение и высокую плотность стыковки торцов волокон при монтаже в распределительных сетях. Сведения по областям применения коннекторов того или иного типа представлены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Применение оптических разъёмов

Тип разъёма	Фиксация разъёма	Область применения		
		передача данных	кабельное ТВ	измерительная аппаратура
FC	Резьбовая	+	+	
SMA	Резьбовая			+
ST	BNC	+		
SC	Push-Pull	+	+	+
FDDI	Push-Pull	+		

Стабильность геометрических параметров оптических разъёмов очень важна, поскольку разъёмы должны нормально функционировать и после множества операций разъединения и соединения. Для этого необходим контроль геометрических параметров разъёма. Однако из-за ограничения точности контроля и проблем с совмещением сердцевин волокон разъёмы обычно вносят в оптический сигнал значительно большие потери, чем цельное волокно. По этой причине применение оптических разъёмов как правило ограничено терминальными точками системы передачи. Операция разрезания оптического волокна для установки разъёма требует тщательности. Раскалывание или разрез волокна с помощью алмазного резца, которая позволяет сделать чистый и ровный надлом на волокне, называется скрайбированием. В некоторых случаях после применения алмазного скрайбера необходима полировка поверхности торца волокна. Возможные проблемы соединения, являющиеся причинами внешних потерь, показаны на рис. 9.21.

Постоянное сочленение двух волоконных окончаний называется оптоволоконным сплайсом. Для неразъёмного соединения выполняется сращивание волокон методом спайки их торцов. Сращивание волокон методом спайки требует применения специального прибора и высокой точности совмещения торцов волокон.

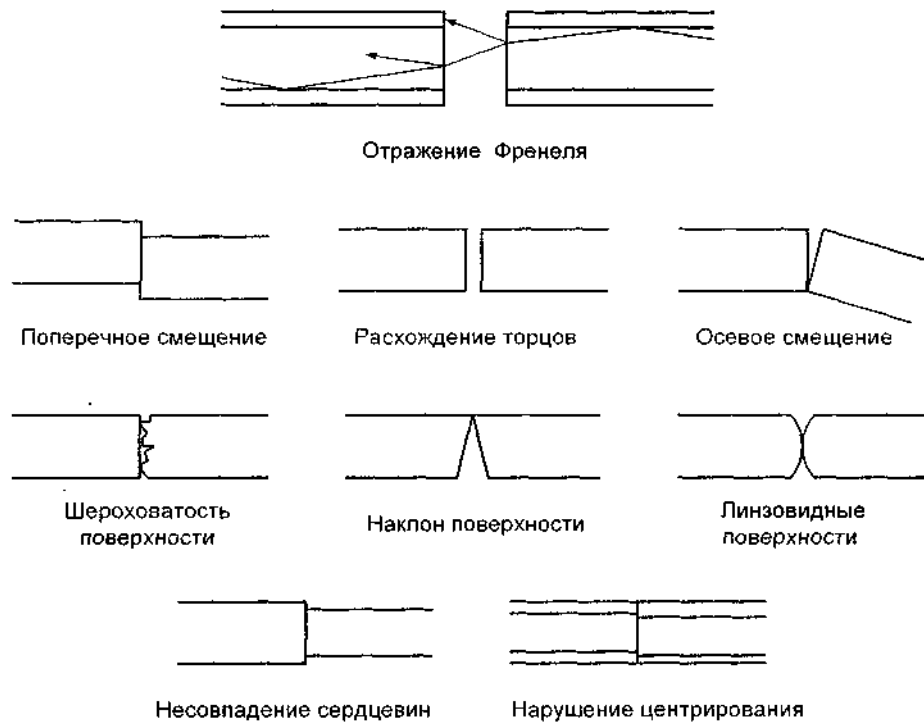


Рис. 9.21. Проблемы, возникающие при монтаже волоконных разъемов

В некоторые приборы для сращивания волокон встроены мощные микроскопы, что затрудняет использование этих приборов в отдельных точках линии. В недавнем прошлом единственным и общепринятым методом соединения многожильных кабелей была спайка каждой пары проводов, которые перед этим скручивались для получения наилучшего контакта. На практике это, конечно, было очень неудобно, требовало дополнительных трудозатрат и увеличивало стоимость обслуживания сети. Сейчас получили широкое распространение практичные и достаточно простые методики сращивания оптических волокон, которые могут применяться в местных условиях и выполняться персоналом, не имеющим высокой квалификации, например, сращивание с помощью стеклянной муфты с гелем, выравнивающим показатель преломления.

При любом типе соединения торцы волокон должны быть хорошо очищены и соответствующим образом подготовлены, а все покрытия, кроме оболочки, должны быть удалены, что может быть сделано механическим или химическим способом. И в том и в другом случае возникает вопрос эффективности передачи энергии через соединение, минимизации потерь из-за оптического отражения и механической надежности соединения. Существуют как внутренние, так и внешние, по отношению к волокну, причины потерь оптического сигнала при его передаче через оптическое соединение. Внутренние потери объясняются различием механических характеристик двух соединяемых волокон и их нельзя компенсировать свойствами или качеством разъема. Несовпадение размеров сердцевин и различие числовых апертур двух волокон являются причинами внутренних потерь в соединении. Внешние потери объясняются не характери-

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

стиками соединяемых волокон, а неправильным или некачественным выполнением соединения и могут быть снижены за счет использования разъема другого типа или другого метода соединения волокон.

Как правило, сплайс-соединение волокон вносит в передаваемый сигнал потери порядка нескольких сотых долей децибела, тогда как потери на механическом соединении волокон могут составлять десятые доли децибела. Особое внимание при выполнении качественного соединения с низкими потерями необходимо обращать на то, насколько сложной будет процедура тестирования соединения, т.е. процедура измерения потерь на соединении. Если потери на соединении действительно измеряются сотыми долями децибела, то уровень точности измерительного оборудования становится существенным фактором при выполнении волоконного соединения. В настоящее время при выполнении соединения широко распространена практика измерения потерь по каждому отдельному волокну. Это измерение можно выполнить, кратковременно направляя световую энергию известного уровня через волоконное соединение. Оптический детектор, соединенный с измерителем мощности, каким-либо образом подключается непосредственно к оптическому волокну после точки соединения. Световая энергия направляется на вход волокна и свободно проходит через бухту оптического кабеля, намотанную на сердечник тестирующего прибора. Потери на входе и выходе соединения можно не принимать во внимание, поскольку они остаются постоянными на протяжении всего измерения. Результатом измерения являются точная величина потерь в соединении, которую можно минимизировать путем некоторых манипуляций с соединением. Конечно, проведение таких измерений на каждом отдельном волокне и каждом отдельном соединении экономически невыгодно и требует много времени.

Существует альтернативная методика измерения потерь, которую необходимо регулярно использовать для тестирования участков волоконно-оптической системы, включающей одно или несколько промежуточных соединений волокон. На рис. 9.22 показана схема измерения по этой методике, в которой используется генератор сигналов и источник света *a*, расположенные на одном конце участка системы, содержащего соединение, и измеритель мощности, установленный на противоположном конце участка. Если длины волокон и потери каждого из отрезков волокна по обеим сторонам от соединения известны, то измеритель мощности на удаленном конце кабеля покажет суммарное значение потерь на двух отрезках волокна и на самом соединении. Если эта величина лежит в разумных пределах, то дальнейшее соединение волокон можно выполнять, не повторяя тестирование соединения в данной точке.

Волоконные соединения в этом случае расположены в трех промежуточных точках. В данном случае волоконный кабель содержит четыре волокна. На каждом отдельном волокне в промежуточных точках между отрезками *A* и *B* и между отрезками *C* и *D* соединения выполнены чисто механически и измерение потерь в них не производится. Изначально исходим из предположения, что способ соединения известен и одинаков для всех разъемов. Источник света подключается к каждому из четырех волокон поочередно в некоторой терминальной точке системы и, при соединенных промежуточных отрезках, показания измерителя мощности снимаются в данном случае в точке между кабелями *B* и *C*. Тогда потери передачи можно вычислить, зная потери в волокне и длину кабеля между терминалом и измерителем мощности. Потери, превышающие потери в самом волокне, могут быть приняты за потери, вносимые соединением между отрезками кабеля *A* и *B*.

9.6. Соединение оптических волокон

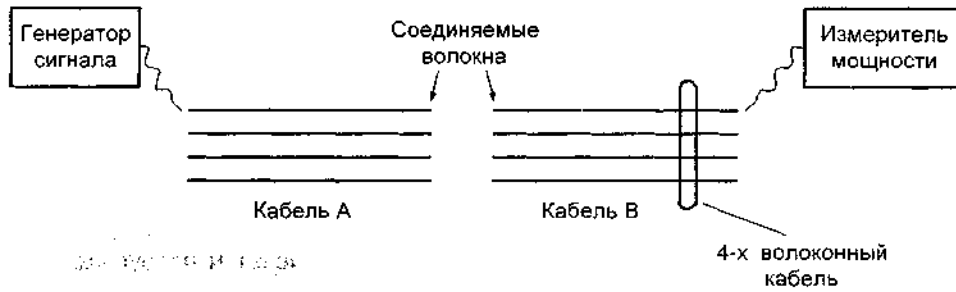


Рис. 9.22. Измерение потерь на соединении

В реальной ситуации потребуется несколько промежуточных отрезков оптического волокна и, соответственно, кабельный участок будет содержать несколько волоконных соединений. На рис. 9.23 показан кабельный участок, включающий четыре отрезка волокна, обозначенные как отрезки А, В, С, D.

Эта процедура тестирования довольно проста, но ее можно еще более упростить, допуская, что можно проводить измерения не по каждому отдельному волоконному соединению, а реже, в зависимости от повторяемости данного способа соединения и допустимых для него потерь, особенно если до этого обнаружили лишь небольшой процент неудовлетворительных соединений. Будем опираться на уровень сигнала в точке измерения, чтобы величина потерь передачи совпадала с предсказанной в этой точке. Если это условие не будет выполнено, то необходимо будет вернуться к точкам промежуточных соединений и повторить их. Следует заметить, что волоконные соединения вовсе не должны быть обязательно последовательно расположены вдоль кабельного маршрута.

Цель любого тестирования заключается в проверке того условия, что величина потерь передачи, вносимых соединением в каждое отдельное волокно, является допустимой, а также того условия, что каждый отрезок волокна характеризуется той величиной затухания, которая было определена при проектировании, или меньшей. Представляется совершенно логичным и практичным подходом проводить процедуры тестирования соединений в различных участках системы одновременно, причем соединение, тестируемое последним, будет являться точкой соединения двух или более участков. Кроме того, разумеется, необходимо провести измерение полных потерь от одной оконечной точки системы до другой. Схема такого измерения показана на рис. 9.24.

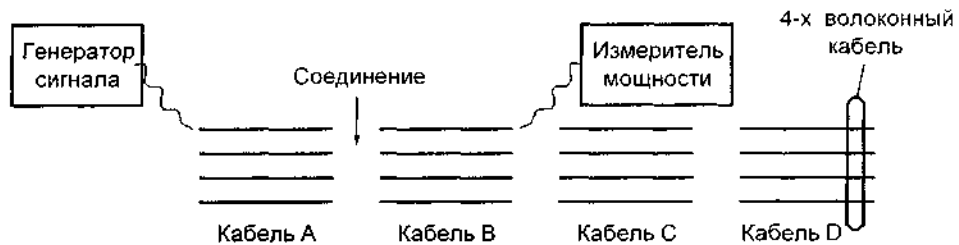


Рис. 9.23. Тестирование нескольких соединений

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

Современные оптические системы проектируются очень консервативно с точки зрения стоимости. Существует множество примеров, когда система спроектирована настолько экономично, что приемники перегружаются высокоуровневыми входными оптическими сигналами и требуется последовательное включение оптических аттенуаторов для нормальной работы системы. В случае гибридных волоконно-коаксиальных кабельных телевизионных систем накладывается ограничение на длину волокна оптического звена и не часто встречается необходимость в оптическом звене длиной несколько километров в отличие, например, от транковой телефонной сети.

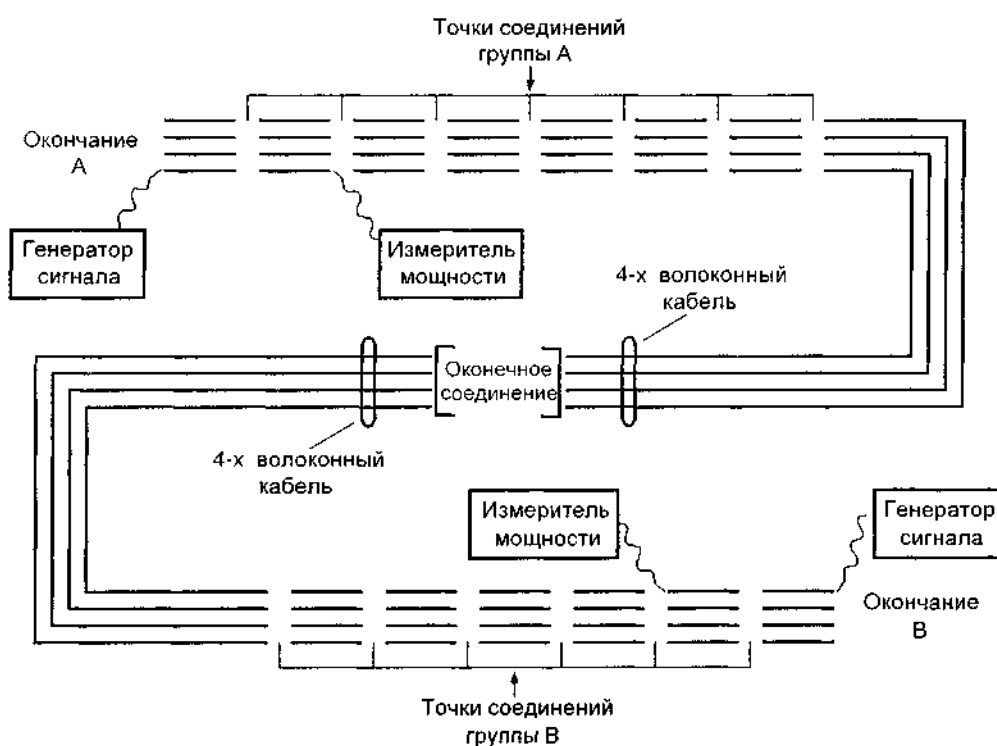


Рис. 9.24. Измерения в системе с множеством соединений

В этом случае возможные потери передачи на отдельных соединениях волокон будут менее существенны, поэтому нет необходимости в высококачественных соединениях с потерями в сотые доли децибела, использование которых очевидно будет неэкономичным. Вероятно, основное внимание следует уделять именно практической эффективности соединений, а их количество и абсолютное значение потерь передачи может учитываться во вторую очередь. Методы сращивания, позволяющие достигать очень высокого качества соединения, из-за сопутствующей им сложности и высокой стоимости в обычных условиях могут быть нерентабельными. При допустимом уровне потерь, вносимых разъемным соединением, разработчик получает преимущество в снижении стоимости прокладки системы. Конечно, на тех участках системы КТВ, где в соответствии с архитектурой системы необходимы сверхдлинные кабельные

участки, как, например, на транспортной линии, фактор потерь на соединении заслуживает более серьезного рассмотрения, чем в случае магистрального или распределительного участка системы кабельного телевидения, где имеют место относительно короткие кабельные участки. Во многих случаях использование простого механического соединителя, потери на котором составляют 0,1 – 0,2 дБ, будет вполне приемлемым и экономичным решением. Уделяя большое внимание качеству кабельных соединений, нельзя забывать и о качестве прокладки самого кабеля.

Используется и такой подход, когда в системе кабельного телевидения заранее предусматриваются точки соединений, в которые затем будут подключаться новые отрезки оптического волокна. Такая точка является по существу готовым соединением. В неиспользуемые точки устанавливаются специальные оптические заглушки для нормально прохождения сигнала по волокну без потерь. Планирование таких точек на этапе проектирования позволяет, в частности, упростить последующее расширение системы.

9.7. Защита оптического волокна

Главная функция кабеля состоит в изолировании и защите каждого стеклянного волокна от любых возможных воздействий и напряжений. К факторам воздействия относится влажность, температура и различные механические напряжения. Влияние температуры сказывается в термическом расширении и сжатии материалов кабеля. Механические воздействия неизбежны при прокладке кабеля. Смысл объединения множества пар металлических проводников в единый кабель заключался в том, чтобы за счет каждого отдельного провода придать всему кабелю существенную механическую прочность и сопротивляемость растяжению. Не совсем так обстоит дело в волоконно-оптическом кабеле. Структура оптического кабеля усложняется тем, что каждое волокно необходимо дополнительно изолировать и нельзя фиксировано закреплять на оплетке кабеля. Например, чтобы избежать натяжения оптического кабеля при его протяжке, предусматривается допуск на единицу длины кабеля на изгибы волокна и на термическое изменение его длины. В результате отдельные волокна способны двигаться в разных направлениях относительно кабельной оболочки.

Во всех конструкциях волоконно-оптического кабеля сборка волокон спиралеобразно закручивается по всей длине кабеля, а затем, как правило, заливается эластичным водонепроницаемым составом. Сравнительное рассмотрение различных вариантов структуры показывает, что во всех модификациях обеспечивается существенная изоляция волокон от механических и других воздействий. Когда в процессе прокладки кабель протягивают через здание или укладывают под землей, кабельной структуре передаются многочисленные деформации и растяжения, которые, в конечном итоге, могут сказаться и на сердцевине кабеля. Это может привести к удлинению кабеля или к другим нарушениям его структуры, но в кабелях высокого качества те факторы, воздействие которых напрямую передается оптическим волокнам, почти полностью устраняются. Применение материалов, имеющих хорошую термическую совместимость (как в случае плотной буферной трубки) и предотвращающих выгибание кабеля и проникновение в него влаги, позволяет сегодня изготавливать кабели, которые надежно служат в течение многих лет в неблагоприятных

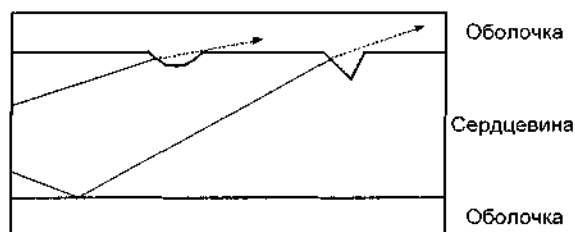


Рис. 9.25. Микроизгиб

условиях внешней среды. Кабель любой структуры, возможно за исключением ленточной, может производиться с широким диапазоном емкостей, которая определяется количеством волокон в кабеле.

Благодаря свойствам стеклянного волокна решается проблема электромагнитной совместимости, устраняется опасность повреждения молнией и проблема тока оболочки кабеля. Металлические несущие элементы придают структуре кабеля прочность, однако, в настоящее время существует много высокопрочных и вместе с тем гибких материалов, из которых может быть выполнен несущий элемент кабеля.

Таким образом, при производстве оптического кабеля можно обойтись без металлических частей, используя другие материалы. Особенности волокна, связанные с его повышенной чувствительностью к механическим напряжениям, делают необходимо уделять особое внимание механической защите волокна. Например, в металлических кабелях такие особенности как микроизгибы и макроизгибы не рассматриваются вовсе. Микроизгибами называются небольшого размера области резкого изменения физической структуры сердцевины волокна или скачкообразные нерегулярности структуры на границе оболочки и сердцевины. На рис. 9.25 схематически показано оптическое волокно с такими дефектами. Такие нерегулярности могут быть очень мелкими, но тем не менее вносить значительное дополнительное затухание в оптический сигнал, передаваемый по волокну. Микроизгибы образуются как правило в процессе производства волокна. Макроизгибом называется изгиб волокна до такого малого радиуса, при котором световые лучи в точке изгиба начинают выходить в оболочку волокна, как показано на рис. 9.26. Величина радиуса макроизгиба зависит от размера и типа волокна, а также от рабочей длины волны волокна. Чем больше рабочая длина волны, тем скорее скажутся потери сигнала по причине макроизгибов.

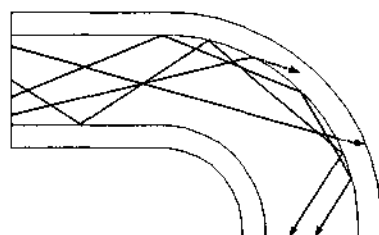


Рис. 9.26. Макроизгиб

9.7. Защита оптического волокна

Для защиты от макроизгибов отдельные волокна покрываются одним или двумя слоями полимерного материала, толщина которого обычно составляет от 65 до 185 мкм. Больше эту толщину не делают, чтобы не затруднять обработку волокна. Перед скруткой волокон с целью их соединения полимерное покрытие следует удалить механическим или химическим способом. Поверх покрытия полимером во многих кабельных структурах делается дополнительная защита волокон от механического напряжения, влажности и химических реакций. Это делается путем заключения каждого отдельного волокна в кольцевую буферную трубку. На рис. 9.27 показан один из методов буферной защиты, который общепринято называть методом свободной трубки. Здесь диаметр защитного кожуха (трубки) значительно превосходит внешний диаметр волокна. Это позволяет волокну свободно двигаться и распределяться внутри трубки в результате изменения его длины, что и показано на трех частях рисунка.

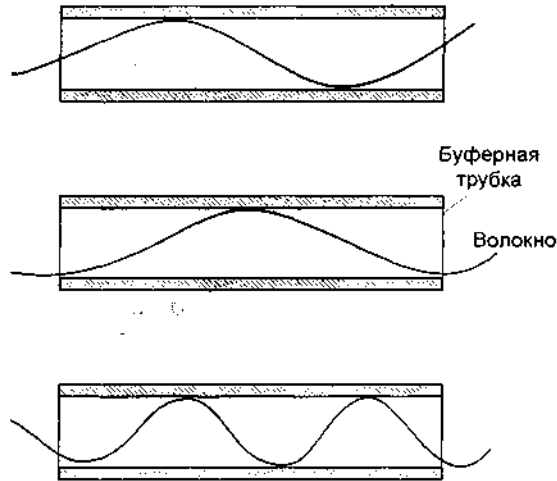


Рис. 9.27. Свободная буферная трубка

Сам материал трубки обеспечивает некоторую плавность скольжения волокна в трубке, но, кроме того, внутренность трубки может быть заполнена каким-либо эластичным составом или гелем, который не допускает проникновения внутрь влаги.

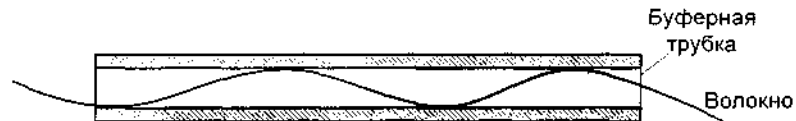


Рис. 9.28. Плотная буферная трубка

Другой метод буферной защиты показан на рис. 9.28. Здесь буферная трубка довольно плотно облегает волокно, поскольку ее внутренний диаметр лишь немного больше внешнего диаметра волокна. По принципу действия эта конфигурация похожа на изолированный металлический проводник в обыкновен-

Глава 9. Волоконно-оптические кабели

ном многожильном кабеле. Ранее для изготовления плотных буферных трубок использовались материалы, которые не были полностью термически совместимы с материалом самого оптического волокна. Ввиду этого, когда трубка подвергалась термическому сжатию, волокно испытывало некоторое напряжение. Эта проблема была в существенной мере решена в кабелях более позднего выпуска применением трубок из других материалов с большей температурной стабильностью и лучшей совместимостью. На рис. 9.29 видно, что буферизация плотной трубкой не позволяет разместить слишком много дополнительной длины волокна, хотя волокно и перемещается независимо относительно трубки. Чтобы компенсировать этот недостаток, по всей длине кабеля волокна спирально закручиваются для размещения в трубке волокна большей длины.

Резюме

Аналогично тому, как электромагнитные волны можно направить по коаксиальному кабелю, световые волны можно направить по оптическому волокну, однако в основе каждой технологии лежат свои физические принципы. Принцип распространения света в волокне более сходен с электромагнитной волной в полом металлическом волноводе, чем с передачей в проводнике.

Распространение света в оптическом волокне описывается его основными свойствами – отражением, преломлением, дифракцией, дисперсией, рассеянием и поглощением. Значительно повысить эффективность передачи световой энергии можно только при помощи закрытой среды, в которой область распространения световой волны ограничена. С другой стороны, эффективность передачи повышается в случае использования когерентного направленного источника с узким спектром излучения. Волокно характеризуется числовой апертурой, диаметром поля мод и диаметром сердцевины. Различают многомодовое и одномодовое волокно. В любом многомодовом волокне в большей или меньшей степени происходит уширение импульса за счет модовой дисперсии. Волокно с различными показателями преломления сердцевины и оболочки называют волокном со ступенчатым профилем, а волокно с постепенно меняющимся показателем преломления сердцевины называют волокном с градиентным профилем. В волокне имеет место и другой вид затухания, объясняемый наличием механических дефектов (микроизгибов) на протяжении всего волокна и возможными при прокладке кабеля повреждениями. Потери в волокне зависят от длины волокна, длины волны и величины дисперсии. В конечном итоге все эти характеристики зависят от технологии производства волокна.

Почти все традиционные методики построения кабельных структур пригодны и для волоконно-оптического кабеля. Присущие волоконному кабелю малые размеры, небольшой вес и малые потери, делает возможным прокладывание более длинных непрерывных кабельных участков. Отрезки оптического кабеля могут быть соединены с помощью разъемов, называемых оптическими соединителями, или методом сращивания. Соединение оптических волокон до недавнего времени представляло собой довольно сложную задачу, но последние достижения в технологии сращивания и в производстве оптических разъемов позволяют получать качественные и эффективные соединения.

УСИЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В этой главе рассмотрим активные компоненты (усилители) кабельных систем передачи, определим их назначение и основные функции. Будут рассмотрены типы усилителей сетей КТВ, предъявляемые к ним требования, конструктивные особенности усилителей и те основные технические характеристики, которые производитель должен указывать в спецификации усилителя. Инженерный подход к выбору усилителей должен базироваться на условии обеспечения установленного стандартом качества обслуживания в системе по критерию минимизации затрат. Этот критерий, интерпретированный в соответствии с требованиями стандарта, позволяет разработчику избежать ошибок при выборе оборудования и проектировании кабельной сети.

10.1. Назначение и классификация усилителей

Любой усилитель, как подразумевает само название, предназначен для подачи на его вход слабых сигналов (с малой амплитудой) и получения на его выходе тех же сигналов, но с более высокой амплитудой. В коаксиальных кабельных системах усилитель служит для компенсации потерь передачи в линейном тракте, а на частотах передачи, обычно используемых в системах КТВ, потери передачи таковы, что усиление сигнала требуется довольно часто на протяжении маршрута системы. Реальные системы КТВ какого-либо значительного размера области обслуживания обязательно включают в себя последовательность соединенных блоков или звеньев, называемых каскадами. Соединение является последовательным, т.е., выход любого звена соединен со входом последующего звена посредством участка коаксиального кабеля некоторой длины.

Коротко сформулируем особенности использования усилителей, которые уже были рассмотрены в предыдущих главах. Любой усилитель является активным, т.е. потребляющим электроэнергию, прибором, так как для восстановления уровня сигнала необходимо подать на усилитель некоторое питающее напряжение. Ключевой особенностью каждого усилителя является то, что кроме полезной функции (усиления сигнала) он ухудшает качество проходящего через него сигнала. Ухудшение заключается в нелинейных искажениях сигнала и увеличении шума в полосе его передачи. В каскаде усилителей ухудшение качества передачи накапливается, складываясь в логарифмическом масштабе. Каскад, как правило, создается из однотипных усилителей. Исходя из допустимой стандартом степени ухудшения качества и указанных в спецификации данного усилителя качественных показателей искажений и шума, разработчик рассчитывает уровни передачи сигнала во всех точках кабельной сети и определяет ее возможную протяженность. Другими словами, использование усилителей для расширения кабельной сети ограничено нормативными значе-

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

ниями показателей качества передачи. Качественные показатели, указываемые производителем в спецификации, определяются типом и моделью (конструкцией) выбранного усилителя.

Существует несколько типов усилителей, предназначенных для включения в разных точках кабельной системы КТВ и имеющих различные функции и технические характеристики. Основные технические требования к усилительным устройствам кабельных сетей и изложены в стандарте EN 50083-3. Усилители системы КТВ можно классифицировать разными способами. Одна из классификаций разделяет все усилительные устройства на два больших класса. Усилители первого класса предназначены для создания протяженных каскадов (магистралей), а усилители второго класса предназначены для включения в магистральных ответвлениях, имеющих ограниченную протяженность (домовые сети). Эта классификация является не требованием, а скорее рекомендацией стандарта для производителей усилительного оборудования и разработчиков кабельных сетей. Исходя из нее разработчик имеет возможность выбора подходящего оборудования для обеспечения сигналом требуемого качества всей обслуживаемой области при минимальных затратах на оборудование, оптимизируя соотношение цена-качество. Согласно другой классификации усилители делятся на узкополосные (канальные) и широкополосные (диапазонные). Канальные усилители являются частью комплекса оборудования головных станций, а диапазонные антенные (мачтовые) усилители, устанавливаются на приемных окончаниях радиорелейных звеньев системы. Усилители магистральных каскадов и магистральных ответвлений должны быть только широкополосными.

Исходя из наиболее общих различий по функциональному назначению, все усилители можно разделить на три группы:

- магистральные (транковые);
- распределительные (фидерные);
- антенные (мачтовые).

Антенные усилители устанавливаются на выходе приемного антенного комплекса перед входом головной станции для усиления слабого эфирного сигнала (НТВ или СТВ), подаваемого на вход головной станции, при условии получения как можно большего отношения C/N . Для этого антенный усилитель должен иметь очень малый коэффициент шума и расширенный приведенный динамический диапазон.

При создании распределительной кабельной сети используются первые два типа усилителей. Магистральные усилители также называются транковыми, от английского "trunk" (магистраль). Магистральные усилители, в свою очередь, делятся на линейные и мостовые. Линейные магистральные усилители предназначены исключительно для каскадирования. С их помощью требуемый уровень сигнала поддерживается в магистральных направлениях, распространяющих сигнал от узловых станций на довольно большие расстояния. Мостовые магистральные усилители могут быть включены в магистральном каскаде, но, кроме того, имеют дополнительный выход для подключения магистрального ответвления, т.е. выполняют функцию первого усилителя в фидере. Распределительные усилители называются также фидерными или усилителями линейного расширения. Они предназначены для доведения сигнала с требуемым уровнем до всех абонентских точек в домовой распределительной сети и могут обслуживать многоквартирный дом или несколько близкорасположенных

10.1. Назначение и классификация усилителей

небольших зданий. Как правило, один фидерный усилитель устанавливается на целый многоквартирный дом, поэтому фидерные усилители еще называют домовыми. Фидерные усилители могут выполнять, кроме усиления, функцию распределения сигнала по нескольким направлениям (например, по стоякам многоквартирного дома), поэтому одной из характеристик фидерного усилителя является количество активных выходов.

Домовые и магистральные усилители различаются рабочими характеристиками и стоимостью. Качество сигнала в магистрали должно быть очень высоким, а протяженность ее может быть довольно большой, поэтому магистральные усилители характеризуются очень высокими качественными показателями. Домовые усилители имеют более простую структуру, менее высокие показатели качества передачи и, следовательно, меньшую стоимость. В некоторых универсальных устройствах функции магистрального и домового усилителя совмещены и их включение возможно как на магистральном участке, так и на участке домовой распределительной сети. Стоимость таких усилителей обычно выше. Усилители обоих типов содержат в основном одни и те же структурные блоки, но в их структурах есть и различия. Далее рассмотрим обобщенные структурные схемы усилительных устройств, выделим обязательные для любого усилителя блоки и определим отличительные особенности каждого типа усилителей.

10.2. Структурные схемы усилительных устройств

На рис. 10.1 изображена обобщенная схема простейшего усилителя. На этой схеме показаны основные структурные блоки усилителя. Все передаваемые сигналы усиливаются в радиочастотном усилительном модуле.

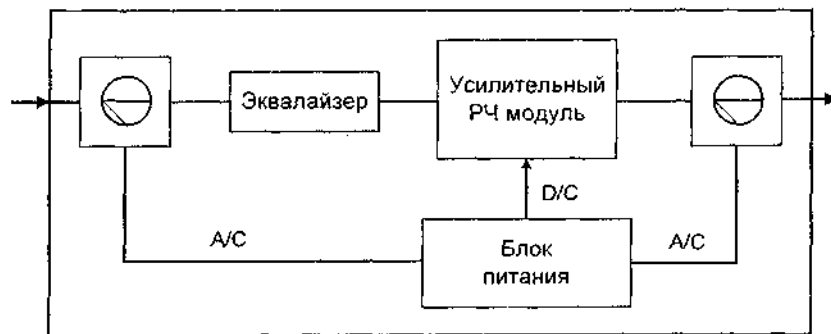


Рис. 10.1. Структурная схема однонаправленного усилителя

Каждый усилитель имеет собственный встроенный блок питания, производящий постоянный ток для питания усилительного модуля. Для выделения тока питания из общего сигнального кабеля в структуре имеются ответвители (А/С). Усилительный модуль может содержать несколько (по крайней мере две) ступеней усиления. Для входной ступени наиболее критичным показателем является отношение сигнала к шуму, а для выходной – показатели нелинейных искажений. Ступенчатая структура усилительного модуля характерна для магистральных усилителей. Усилительное устройство может включать несколько эквалайзеров, установленных как на входе или выходе усилителя, так и между

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

ступенями усилительного модуля (межкаскадный эквалайзер). Назначение эквалайзера состоит в компенсации линейного искажения спектра передачи, полученного в результате прохождения сигнала через коаксиальный кабель и пассивные устройства, т.е. в снижении неравномерности АЧХ тракта передачи. В данной схеме сигнал проходит через эквалайзер перед усилением.

Усилители в системах КТВ получают питание непосредственно по магистральному кабелю дистанционно. Переменное напряжение питания (обычно 60 В) подается в кабель с помощью инсертеров через определенные промежутки в точках инъекции мощности питания, которые также называют точками вставки питания (power insertion). Все приборы сети, такие как ответвители, делители, а также сами усилители должны свободно пропускать это напряжение для питания последующих усилителей в магистральном каскаде и в линейных ответвлениях.

В структуре усилителя строго разделены два пути прохождения тока. По одному проходит радиочастотный сигнал, а по другому выделенному пути проходит ток питания. На рисунке путь прохождения тока питания обозначен А/С. Цепь питания образована с помощью низкочастотных фильтров и ответвителей тока питания, чтобы ток питания частоты 50 Гц мог передаваться через усилитель независимо от сигнала радиочастоты. Цепь питания в усилителе, фильтрует, регулирует и выпрямляет переменное напряжение питания и затем подает полученный постоянный ток в блоки усилителя.

Чтобы усилительное устройство создавало необходимое усиление в обоих направлениях передачи, в его схему включается дополнительный усилительный модуль обратного направления передачи. Частотное разделение спектров прямого и обратного каналов внутри усилителя осуществляется путем включения на входе и выходе усилительного устройства специальных радиочастотных фильтров, называемых частотными диплексерами. Конструктивно диплексер представляет собой пару звездообразно включенных фильтров – верхних частот ВЧ (HP, High Pass) и нижних частот НЧ (LP, Low Pass). Иногда вместо усилителя обратного канала включают перемычку. Такой обратный канал называют пассивным, а потери сигнала в нем равны удвоенным потерям частотного диплексера на нижних частотах. Простейшая схема двунаправленного усилителя показана на рис. 10.2. Для простоты изображения на рис. 10.2 и в последующих рисунках цепи питания не показаны. С помощью такого устройства коаксиальная кабельная система может использоваться как двунаправленная передающая система или система с обратным каналом. При разработке двунаправленного усилителя определяется его полоса пропускания в каждом направлении передачи и наличие некоторых дополнительных функций, например, автоматической регулировки. На рис. 10.2 изображена наиболее общая схема, но возможны и другие варианты структуры.

Системы любой значительной протяженности требуют введения определенной степени автоматической регулировки. Используется автоматическая регулировка двух типов: автоматическая регулировка усиления АРУ (в зарубежной литературе она называется Automatic Gain Control, AGC) и автоматическая регулировка наклона АРН (в зарубежной литературе Automatic Slope Control, ASC). Иногда в усилителе используются устройства авторегулировки обоих типов. На рис. 10.3 показана блок-схема однонаправленного усилителя с устройством авторегулировки. В этой схеме на выходе основного усилительного РЧ модуля имеется направляющий ответвитель, который отводит долю выходной

10.2. Структурные схемы усилительных устройств

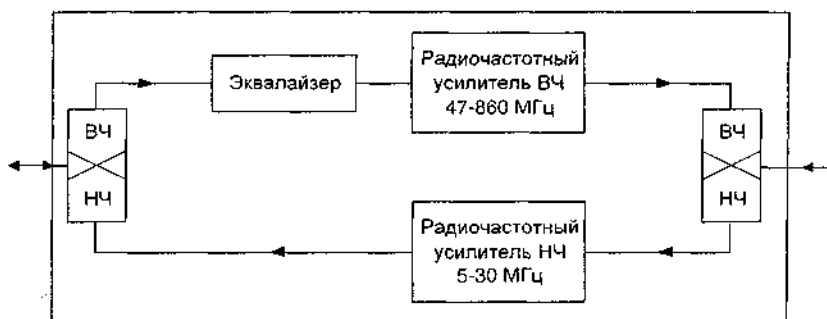


Рис. 10.2. Структурная схема двунаправленного усилителя

энергии РЧ сигнала. Затем этот отведенный РЧ сигнал подается на блок автоматической регулировки. После его обработки блок автоматической регулировки выдает управляющее напряжение для управления рабочими параметрами основного усилительного модуля.

Как магистральные, так и домовые усилители могут иметь любой вариант структуры из показанных на рис. 10.1, 10.2, 10.3. Однако, магистральный усилитель может иметь еще один вариант структуры. Широко используемая конфигурация магистрального усилителя в действительности содержит два отдельных усилительных блока внутри одного устройства. В однонаправленной схеме первый блок предназначен для усиления сигнала в магистральном кабеле, а с помощью второго блока, который называется мостовым усилительным блоком (в зарубежной литературе *bridger*), часть входного сигнала усиливается и подается через специальный делитель (в зарубежной литературе *director*) по магистральным ответвлениям в распределительную кабельную сеть. Такое усилительное устройство может содержать различные схемотехнические решения для распределения усиленного сигнала по нескольким направлениям. На рис. 10.4 изображена структура однонаправленного усилителя с главным и мостовым усилительными блоками, имеющая возможность деления сигнала для его последующего ответвления в кабельную сеть. Усилитель с мостовым блоком, предназначенный для подачи сигнала в более чем одно фидерное ответвление, иногда еще называют распределительным усилителем. Усилитель с мостовым блоком часто называют просто мостовым усилителем.

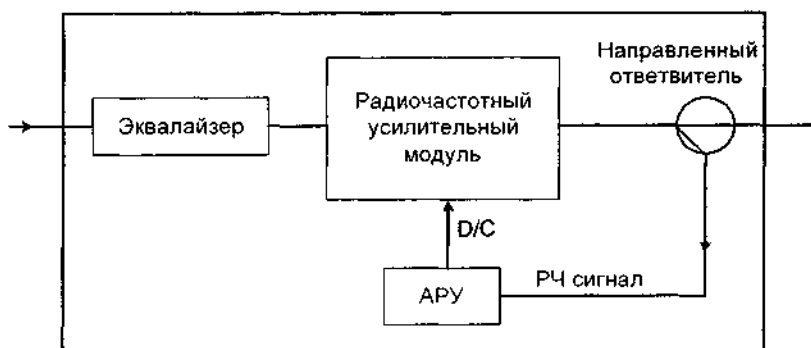


Рис. 10.3. Однонаправленный усилитель с АРУ

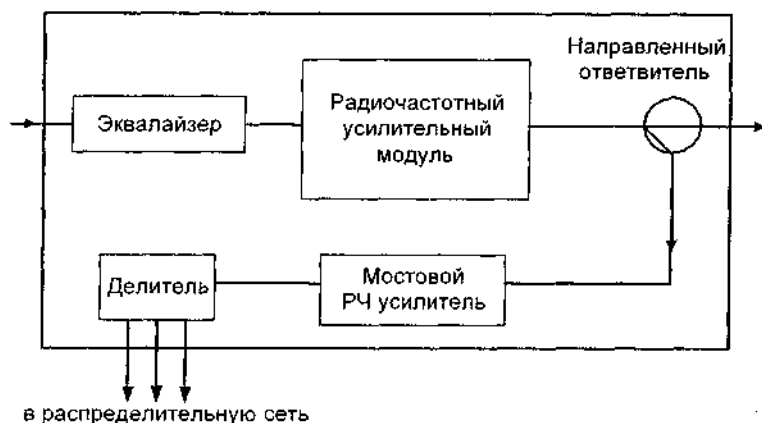


Рис. 10.4. Однонаправленный усилитель с мостовым блоком

На рис. 10.5 показана типичная структура двунаправленного распределительного усилителя с пассивным обратным каналом. В данной схеме сигнал делится между тремя выходными портами, а ниже показаны варианты применения перемычек для управления прохождением сигнала. Закорачивающие перемычки в делителе позволяют подключать к усилителю входной и выходной кабель со стороны одного порта. Если усилитель имеет встроенный делитель или ответвитель, разделение сигналов выполняет внутренняя схема устройства (не показана на рисунке). Возможность деления сигнала таким способом в длинном каскаде усилителей значительно снизит количество кабельных разъемов. На рис. 10.6 показаны варианты использования делителя сигнала в распределительном усилителе.

Мостовые магистральные усилители применяются для создания так называемой распределительной структуры транк-фидер, в которой различают транковый кабель (trunk) и фидерный кабель (feeder). Транком называют магистральный кабельный маршрут, а фидером называют второстепенный кабельный маршрут, ответвляемый от транкового кабеля. В соответствии с архитектурой системы КТВ транком является любая магистральная линия, а фидером любое

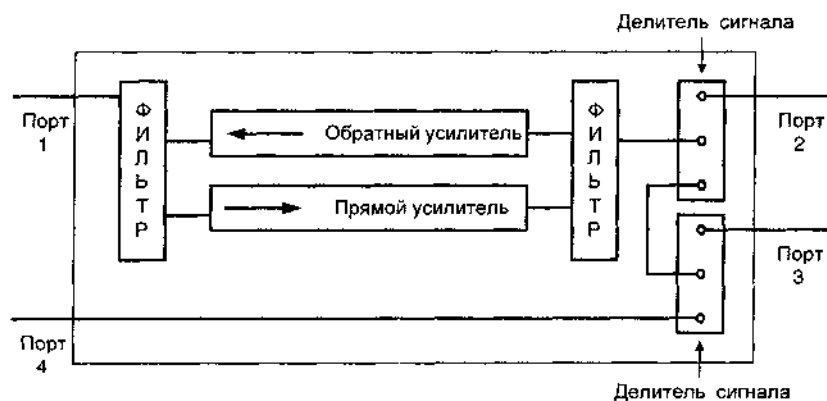


Рис. 10.5. Двунаправленный распределительный усилитель

10.2. Структурные схемы усилительных устройств

магистральное ответвление. Например, транковый кабель находится между узловой головной станцией системы КТВ и пунктом домового ввода, а по фидерному кабелю сигнал подается в домовую сеть. Структура транк-фидер будет подробно рассмотрена в главе, посвященной проектированию усилительных участков. Используя отдельные усилительные модули для магистрального (транкового) кабеля и кабеля магистрального ответвления (фидерного кабеля), разработчик может осуществлять раздельное управление уровнем этих сигналов. Транковый и фидерный выходы имеют независимые модули регулировки усиления и, если необходимо, можно установить различные амплитуды для выходных уровней транкового кабеля и фидерного кабеля. Удобство такого использования усилителя станет очевидным при последующем обсуждении методик проектирования сети. Понятия "транк" и "фидер" используются в терминологии стандарта EN-50083, но по существу являются синонимами понятий "магистраль" и "магистральное ответвление" и здесь используются лишь для удобства разграничения принципиально различных частей распределительной сети.

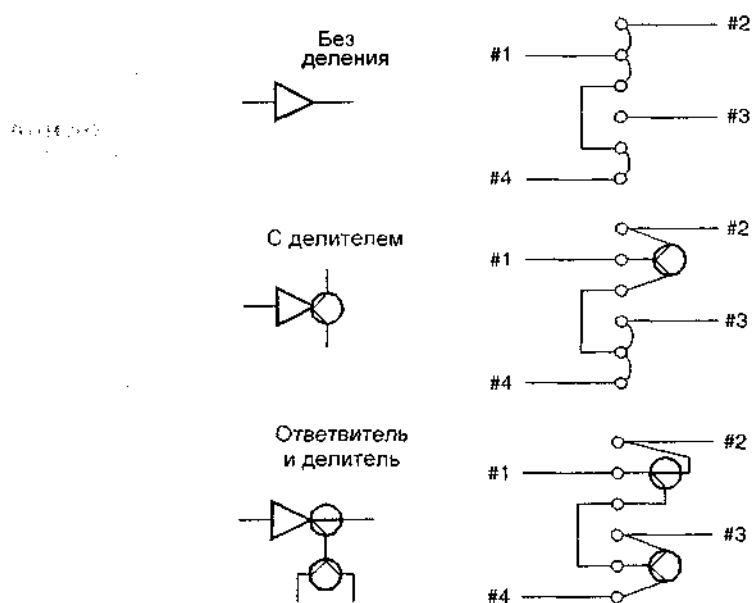


Рис. 10.6. Применение делителя

На рис. 10.7 изображен магистральный мостовой усилитель, аналогичный показанному на рис. 10.4, с добавленным усилительным модулем обратного направления передачи, предназначенный для работы в двунаправленной кабельной системе. Эта схема может служить иллюстрацией к последующему рассмотрению принципа передачи в обоих направлениях через одно усилительное устройство. Принцип действия этого устройства довольно прост. Радиочастотный сигнал направляется в коаксиальный кабель и, пройдя по нему некоторое расстояние, поступает в данное устройство, включенное на удаленном конце кабеля (с левой стороны рисунка). Внутри усилителя этот сигнал сначала попадает на вход фильтра НЧ-ВЧ. Этот фильтр действует таким образом, что на одном из его выходов (НЧ) создается более высокое сопротивление

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

для высокочастотных сигналов, а на другом выходе (ВЧ) создается более высокое сопротивление для низкочастотных сигналов. Поэтому на высокочастотном выходе отсутствуют низкочастотные сигналы и наоборот. Встречая высокое сопротивление на каком-либо из входов, сигнал выходит через общий выходной порт. Заметим, что понятия “вход” и “выход” здесь относительны, поскольку рассматриваем двунаправленную систему и каждый порт фильтра (и любого другого блока) может действовать и как вход и как выход.

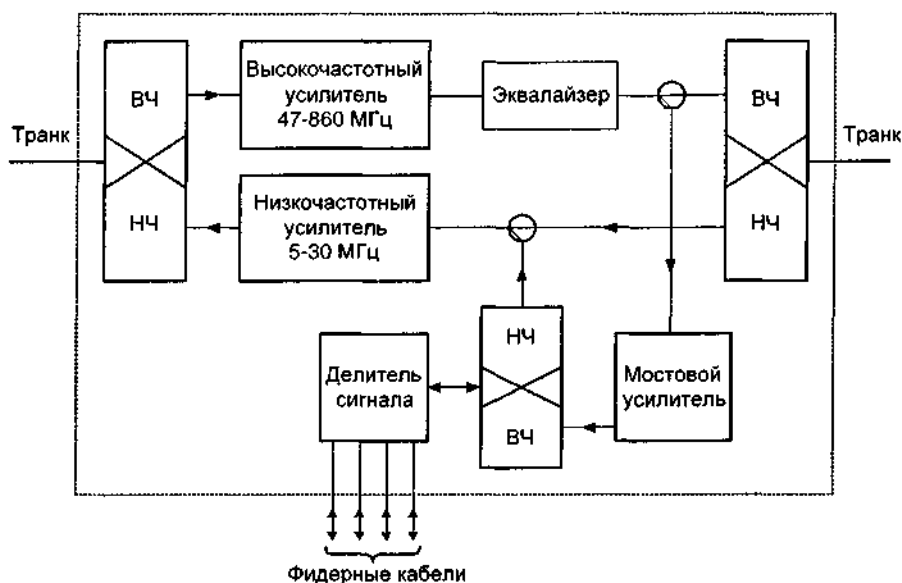


Рис. 10.7. Двунаправленный транковый усилитель с мостовым блоком

Затем сигналы с высокочастотного выхода проходят через эквалайзер и поступают на вход основного радиочастотного усилительного ВЧ модуля. После усиления сигналы ВЧ поступают на направленный ответвитель. С одного из выходов ответвителя некоторая часть ВЧ энергии проходит на другой НЧ-ВЧ фильтр идентичный тому, что находится на входе устройства. Здесь ВЧ сигнал встречает высокое сопротивление на низкочастотном входе фильтра и направляется на общий выход данного устройства, а затем распространяется через коаксиальный кабель к последующим приборам системы. Со второго выхода направленного ответвителя оставшаяся часть ВЧ энергии поступает на вход мостового усилительного ВЧ модуля, который действует тем же образом, что и аналогичный блок на рис. 10.3. С выхода мостового усилителя энергия РЧ сигнала поступает на высокочастотный вход еще одного НЧ-ВЧ фильтра. ВЧ сигнал встречает высокое сопротивление со стороны низкочастотного входа фильтра и поэтому направляется далее на общий выходной порт фильтра. Здесь сигнал поступает на делитель сигналов, откуда все сигналы подаются в несколько распределительных (фидерных) кабелей.

Проследим процесс прохождения по усилительному устройству сигналов обратного направления передачи (НЧ). Низкочастотные составляющие радиочастотного сигнала будут поступать на вход устройства, показанного справа на рис. 10.7. Затем эти сигналы поступают на общий порт НЧ-ВЧ фильтра. Здесь

10.2. Структурные схемы усилительных устройств

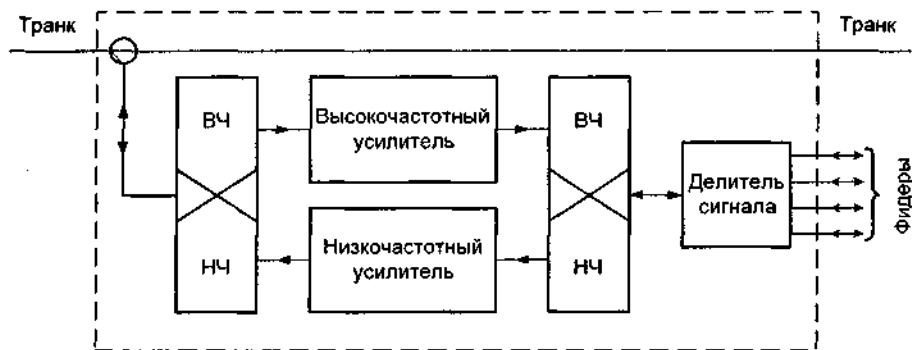


Рис. 10.8. Промежуточный мостовой усилитель

они встретят высокое сопротивление на высокочастотном выходе и пройдут на НЧ выход фильтра. Затем они пройдут через устройство объединения сигналов (сумматор) и поступят на вход низкочастотного усилительного модуля. После усиления НЧ сигналы поступят на низкочастотный порт НЧ-ВЧ фильтра (слева на рис. 10.7), где они встретят высокое сопротивление со стороны высокочастотного порта и выйдут на общий порт фильтра, а затем поступят в коаксиальный кабель, подключенный к этому порту.

На рис. 10.8 показан промежуточный мостовой усилитель, располагаемый в той точке транкового кабеля, где не требуется усиления для транка, а нужно только усиление для фидера (например, если уровень сигнала в данной точке основного кабеля еще не достиг минимально допустимого значения, а маршрут фидерного кабеля продолжается).

На рис. 10.9 показан оконечный мостовой усилитель, устанавливаемый в той точке, за которой транковый кабель не продолжается (например, на конечном участке транкового кабеля).

Мостовые устройства могут включать поддержку обратного канала, как показано на рис. 10.7, 10.8, 10.9.

Обратите внимание на то, что отводы делителя сигнала на рис. 10.7 работают в обоих направлениях передачи. Низкочастотные сигналы обратного канала, поступающие из распределительной сети по подключенным к этим отводам

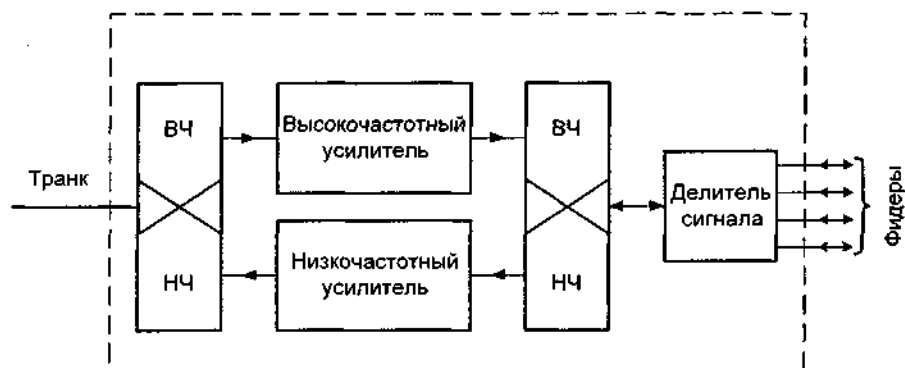


Рис. 10.9. Оконечный мостовой усилитель

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

фидерным кабелям, свободно проходят через делитель, который не имеет свойств направленного ответвителя или каких-либо частотных свойств. Далее НЧ сигналы попадают на общий порт радиочастотного НЧ-ВЧ фильтра, встречают высокое сопротивление на его высокочастотном выходе и, следовательно, выходят через низкочастотный выход. Затем они поступают на устройство объединения сигналов, в качестве которого обычно используется направленный ответвитель. Здесь эти НЧ сигналы комбинируются с другими сигналами низкой частоты, прохождение которых через устройство было описано выше.

Хотя разнообразие моделей усилителей очень велико, по существу все конфигурации состоят из описанных здесь структурных блоков. Дополнительно усилительное устройство может включать резервные модули для активных блоков и такие вспомогательные средства как устройство для сообщения о рабочем состоянии усилителя (нормальное или аварийное) и управляемый адресный коммутатор для отключения ветви распределительной сети. Обычно усилитель защищается от неблагоприятных влияний внешней среды металлическим корпусом с алюминиевой или оловянной пайкой, который имеет приспособления для монтажа усилителя на мачте или на специальной подставке. Магистральный усилитель монтируется на огнеупорном основании с обеспечением свободного доступа охлаждающего воздуха. Увеличение площади поверхности в виде радиаторных ребер на корпусе гарантируют эффективное охлаждение и высокую надежность.

Для удобства строительства и эксплуатации кабельных сетей изготавливаются усилители модульной конструкции, позволяющие устанавливать частотные дилексеры, настроенные на нужную полосу частот, усилительные модули обратного канала, дополнительные межкаскадные эквалайзеры и аттенуаторы. Существуют универсальные модели распределительных усилителей с двумя активными выходами, в которых регулировка коэффициента усиления и наклона выходной характеристики осуществляется отдельно для каждого из выходов. При необходимости сигнал между выходами может делиться с помощью заменяемых ответвителей разных номиналов. Универсальные устройства с успехом могут применяться как в качестве домовых и фидерных усилителей на разветвлениях магистрали, так и в качестве магистральных усилителей, при этом стоимость усилителя с двумя активными выходами ниже, чем суммарная стоимость магистрального и домового. Это схемотехническое решение исключает необходимость иметь усилители с различными коэффициентами усиления. Усилитель такого типа может быть включён в любой части кабельной сети, что позволяет значительно упростить процесс проектирования, настройки и обслуживания больших кабельных сетей, снизить затраты на строительство и обслуживание сети.

10.3. Спецификация усилителя

Стандарт EN 50083 обязывает производителя приводить в технической документации усилителя следующий перечень параметров:

- полоса рабочих частот прямого и обратного каналов (МГц);
- максимальный выходной уровень прямого и обратного каналов (дБ-мВ);
- показатели нелинейных искажений;
- коэффициент усиления (дБ);
- коэффициент шума (дБ);

10.3. Спецификация усилителя

- приведенный динамический диапазон (дБ);
- показатели линейных искажений;
- развязка между прямым и обратным каналами (дБ);
- потребляемая мощность (Вт).

Рассмотрим эти параметры подробнее.

Диапазон частот прямого канала (Downstream Broadband) определяется степенью линейности АЧХ активных элементов усилителя во всей используемой полосе. В системе передачи каждый усилитель должен иметь полосу частот не меньшую установленной для системы передачи полосы. Это означает, что каждый усилитель должен обеспечивать по возможности постоянное усиление на всех частотах внутри этой полосы. Широкополосность является неременным требованием к усилителям современных кабельных сетей. Ширина полосы частот прямой передачи современных систем КТВ, напомним, составляет 47–1000 МГц. Количество транслируемых аналоговых каналов в таких системах возрастает до 60, а с учетом цифрового уплотнения более 200. Однако, увеличение полосы усилителя приводит к росту нелинейных искажений и вынуждает уменьшать выходной уровень усилителя, что, в свою очередь, сокращает протяженность магистрального усилительного участка. В результате на магистральной линии той же длины потребуется установить большее число усилителей и затраты на строительство системы увеличатся. С другой стороны, если использовать усилители более высокого качества с высокой линейностью АЧХ, для которых нелинейные искажения ниже при том же числе каналов, увеличится стоимость каждого усилителя. Таким образом, при увеличении полосы частот неизбежно получаем некоторое увеличение стоимости строительства системы в расчете на одного абонента, хотя стоимость системы на один канал уменьшается. Этот экономический эффект всегда необходимо учитывать при создании современной широкополосной кабельной сети.

В табл. 10.1 представлены значения возможного числа транслируемых каналов в зависимости от ширины полосы рабочих частот системы. Эти значения являются приблизительными и могут несколько отличаться для каждого конкретного частотного плана в зависимости от местной электромагнитной обстановки, качественных характеристик головной станции и магистральных усилителей.

Таблица 10.1

Возможное число каналов

Тип каналов	Число каналов при ширине полосы, МГц			
	240	450	600	860
Аналоговые	10–15	15–25	25–40	40–60
Цифровые	–	7–8	20–25	150–220
Всего	10–15	15–33	25–65	210–280

Диапазон частот обратного канала (Upstream Broadband) находится в пределах 5 – 30 МГц. В системах с обратным каналом, который имеется у большинства современных кабельных сетей, каждый усилитель должен обеспечивать постоянное усиление и в этой полосе частот. Поскольку нижняя частота для трансляции сигналов прямого канала соответствует 47 МГц (частота первого те-

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

левизионного канала европейского стандарта CCIR), то участок 30 – 47 МГц остается свободным от ТВ вещания. Поскольку потребности в использовании обратного канала растут за счет введения в кабельных сетях высокоскоростных цифровых услуг (в частности, доступа в Интернет) и увеличения числа их пользователей, уже сейчас ощущается недостаточность полосы 5 – 30 МГц для передачи обратных сигналов. Еще одной причиной необходимости расширения полосы обратного канала является его подверженность воздействию внешних электромагнитных помех, что особенно актуально в крупных промышленных центрах. Наиболее сильно поражается низкочастотная область, лежащая в полосе 5 – 12 МГц, где наблюдается значительное ухудшение отношения С/Н (сигнал-шум), означающее, что в обратном канале уровни помех практически сравнимы с уровнями полезных сигналов. В будущем неизбежно расширение обратного канала до 50 МГц и более, поэтому некоторые производители стали выпускать усилители с различной шириной полосы прямого и обратного каналов.

В системах передачи с оптическим обратным каналом за счет широкой полосы частот и отсутствия влияния внешних помех недостатка полосы, предназначенной для обратной передачи, не ощущается. В них сигналы обратного канала передаваться по отдельному оптическому волокну с любой доступной полосой частот. Таким образом, ограничением могут являться только оптические передатчики и центральная головная станция. Выпускаемые в настоящее время оптические передатчики имеют полосу обратного канала не менее 200 МГц. Для стыковки оптической части системы с распределительными коаксиальными кабельными сетями на головных станциях нужно выполнять конвертирование этих частот в стандартные частоты обратного канала 5 – 30 МГц. Такие конверторы обратного канала входят в состав профессиональных головных станций высшего класса.

Максимальный уровень выходного сигнала прямого канала (Maximum Output Level) S_0 – это ссылочный уровень сигнала на выходе усилителя, при котором показатель нелинейных искажений (CSO, CTB, CXM) равен предельному допустимому значению (в дБ по отношению к несущей изображения). Выходной уровень усилителя всегда сопоставляется с определенным значением показателя нелинейных искажений. Важно понимать, как составлена спецификация конкретного устройства, чтобы потом не допускать ошибок при расчете уровней передачи. В соответствии со стандартом CENELEC максимальным уровнем, который должен приводиться в спецификации усилителя, называется именно тот уровень выходного сигнала S_0 , при котором гарантируется, что CSO = 60 дБ (или CTB = 60 дБ), и именно этот уровень должен быть указан в спецификации. Если производитель указывает максимальный уровень по-другому, то обязательно должны быть приведены те значения CSO, CTB и CXM, при которых был получен указанный уровень. Другими словами, максимальный уровень – это лишь некий ссылочный уровень, определенный для стандартной величины искажений.

Для каждого типа искажений должен быть указан свой максимальный выходной уровень. При одной и той же величине искажений (например, 60 дБ) максимальный выходной уровень по искажениям второго порядка S_{0CSO} всегда выше, чем максимальный выходной уровень по искажениям третьего порядка S_{0CTB} , так как искажения второго порядка растут медленнее, чем искажения третьего порядка. Приблизительная величина максимального выходного уровня составляет 120 – 125 дБ·мкВ.

10.3. Спецификация усилителя

Очевидно, выходной уровень усилителя будет максимально возможным в том случае, когда нелинейные искажения не возникают, т.е. когда передается сигнал только одного канала. Но такая ситуация является чисто теоретической и не представляет интереса, а практический интерес представляет случай передачи сигналов, по крайней мере, двух каналов, когда возникают интермодуляционные искажения первого и второго порядков. Максимальный выходной уровень измеряется по стандарту CENELEC следующим образом. На вход усилителя подается сигнал, состоящий из двух немодулированных несущих, имитирующих сигналы двух ТВ каналов, с равными амплитудами. Уровень усилителя увеличивается до тех пор, пока исследуемый показатель нелинейных искажений не достигнет предельного допустимого значения 60 дБ.

Рабочий уровень S может быть как больше, так и меньше максимального на величину, зависящую от разности требуемого и заявленного показателя искажений. При использовании широкополосных усилителей выходное отношение СТВ находится через уже известную формулу (см. гл. 6), из которой рабочий выходной уровень отдельного усилителя можно выразить следующим образом:

$$S = S_{0СТВ} - \frac{СТВ - СТВ_0}{2},$$

где $S_{0СТВ}$ – указанный выходной уровень усилителя (максимальный); $СТВ_0$ – нормативное (указанное) значение, равное 60 дБ; $СТВ$ – требуемое значение СТВ, соответствующее рабочему уровню S .

Аналогично рассчитывается рабочий выходной уровень исходя из других показателей нелинейных искажений:

$$S = S_{0СХМ} - \frac{СХМ - СХМ_0}{2},$$

$$S = S_{0CSO} - (CSO - CSO_0).$$

Этими же формулами можно воспользоваться и для вычисления величины искажений, производимых усилителем при некотором интересующем разработчика выходном уровне. Формулы отражают правило, гласящее, что уменьшение значения выходного уровня усилителя на 1 дБ приводит к улучшению его показателей СТВ и СХМ на 2 дБ и улучшению показателя CSO на 1 дБ. При увеличении выходного уровня на 1 дБ все показатели ухудшаются на те же величины. Независимо от способа представления этих данных в спецификации разработчик будет знать, какие интермодуляционные искажения будет создавать усилитель при соответствующем выходном уровне.

Нельзя забывать о том, что в этих формулах не учитывается зависимость выходного уровня от количества транслируемых каналов. При увеличении (уменьшении) числа каналов в 2 раза максимальный выходной уровень соответственно уменьшается (увеличивается) приблизительно на 3 дБ. Однако, эта зависимость может быть учтена уже в самих значениях показателей нелинейных искажений (СТВ, CSO и CSO), опубликованных производителем. В этом случае в спецификации должно быть указано, какому количеству каналов соответствуют приведенные значения СТВ, CSO и CSO.

Заметим также, что максимальный выходной уровень является характеристикой только отдельно взятого усилителя. В реальной кабельной системе имеем дело с рабочим выходным уровнем, который меньше максимального на

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

величину, зависящую от количества последовательно включенных усилителей в системе. Об определении рабочих уровней усилителя в связи с достижимым при этом качеством передачи пойдет речь в одной из следующих глав.

Максимальный уровень выходного сигнала обратного канала (Maximum Output Level of Upstream) является аналогичной характеристикой сигнала в обратном канале. Методика оценки уровня в обратном канале не стандартизована, но большинство производителей также используют для его измерения метод двух несущих. Существенное отличие состоит в том, что требования к сигналу в обратном канале выше, чем в прямом канале (в частности, по величине СТВ). Максимальный выходной уровень усилителя обратного канала обычно составляет около 115 – 120 дБ·мкВ.

Показатели нелинейных искажений. Согласно EN 50083 для усилителей, предназначенных для работы с более чем 10 ТВ каналами в диапазоне до 862 МГц, должны быть указаны значения СТВ, CSO и СХМ, при которых был получен указанный выходной уровень. Это позволяет разработчику сделать обоснованный выбор оборудования.

Коэффициент усиления (Gain) определяется отношением выходной мощности сигнала к входной мощности сигнала.

$$K = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

Коэффициент усиления показывает, на какую величину в децибелах увеличивается выходной уровень сигнала по сравнению с его входным уровнем после прохождения через усилитель. Таким образом, усиление равно разности выходного и входного уровней:

$$K = S_{\text{вых}} - S_{\text{вх}}.$$

Нужно точно знать, для какой конфигурации усилительного устройства задано значение коэффициента усиления в спецификации, поскольку усилительное устройство обычно включает, наряду с собственно усилителем, несколько дополнительных подключаемых модулей, каждый из которых имеет свои потери или усиление. Большинство производителей дает в спецификации усиления только значение между входом и выходом самого усилительного модуля, как показано на рис. 10.10. Если дополнительные модули также используются, общее полезное усиление устройства будет складываться из значений усиления и потерь L во всех используемых модулях. Как правило, устройство содержит только пассивные дополнительные модули. Поэтому общее усиление K_{Σ} будет ниже значения, заданного в спецификации:

$$K_{\Sigma} = K - L.$$

Здесь и далее во всех расчетах под усилением усилителя будем подразумевать общее усиление между входом и выходом усилительного устройства с учетом всех его внутренних потерь. Так, когда говорим, что усиление усилителя составляет 22 дБ, имеем в виду, что это его полное возможное усиление между входом и выходом. При этом сам усилительный модуль может иметь усиление, например, 24 или 26 дБ.

Зачастую начинающий разработчик в первую очередь обращает внимание на значение коэффициента усиления. Тем не менее, усиление само по себе,

10.3. Спецификация усилителя

без учета создаваемых усилителем нелинейных искажений и мощности шума не может являться критерием выбора усилителя. В зависимости от изменения входных и выходных параметров величина усиления меняется и может быть измерена лишь с некоторой погрешностью (как правило, она составляет не более 3 % от измеренного значения). Поэтому вместе с указываемым в спецификации усилением приводится его погрешность его измерения или допустимое отклонение (допуск). Другой способ предусматривает приведение номинального коэффициента усиления уже с учетом его возможного отклонения. Такое значение усиления можно использовать в расчетах без технологического допуска. Обычные значения коэффициента усиления лежат в пределах 20 – 40 дБ (в зависимости от типа усилителя).

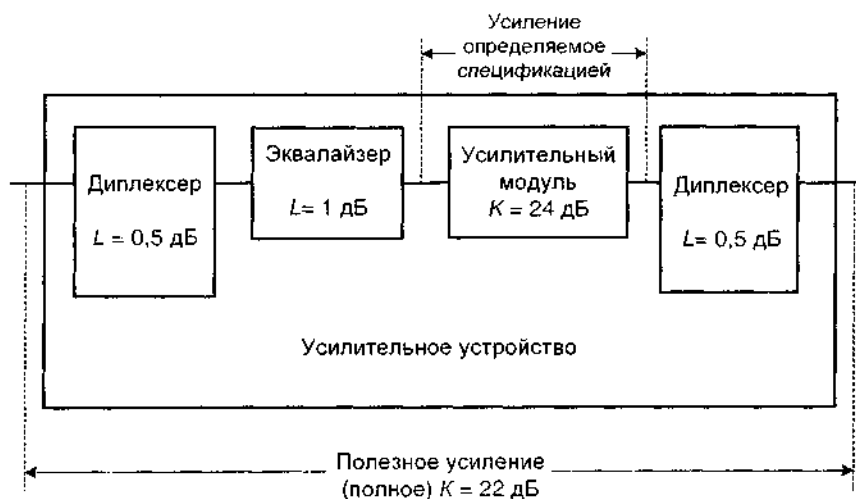


Рис. 10.10. Коэффициент усиления усилительного устройства

Поскольку реальные устройства не могут обеспечить абсолютно постоянное усиление на всех частотах полосы, для оценки разности усиления введен специальный параметр, называемый *допустимой неравномерностью коэффициента усиления* в заданной полосе частот. Величина неравномерности современных усилительных устройств не превышает 2 дБ для домовых усилителей и 1 дБ для магистральных усилителей. Следует обратить внимание на то, как задана неравномерность в спецификации усилителя. Если задано некоторая положительная величина, например 1,5 дБ, это означает, что отклонение коэффициента усиления не превышает 0,75 дБ в обе стороны. Это определение равносильно заданию двух величин – положительного и отрицательного отклонения $\pm 0,75$ дБ.

Коэффициент шума (Noise Figure) характеризует уровень собственных шумов усилителя. Коэффициентом шума называется частное от деления отношения несущая/шум (C/N) на входе усилителя на отношение несущая/шум на выходе усилителя при условии отсутствия нелинейных искажений.

$$F = \frac{(C/N)_{\text{вх}}}{(C/N)_{\text{вых}}}$$

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

Из определения следует, что коэффициент усилителя является безразмерной (относительной) величиной и может быть выражен в децибелах. Разумеется, чем меньший коэффициент шума имеет усилитель, тем выше его качество и тем меньший вклад он вносит в накопление шумов в кабельной системе. Типичные значения коэффициента шума усилителей составляют от 5 до 9 дБ.

Большинство устройств, которые будем использовать, включают кроме собственно усилительного модуля несколько встроенных вспомогательных модулей, подключаемых по выбору, как показано на рис. 10.11. Часто производители определяют значение F усилителя на входе именно усилительного модуля, поскольку заранее неизвестно, какие из вспомогательных устройств впоследствии будут использоваться. Если в структуре усилительного устройства перед самим усилителем подключены какие-либо вспомогательные модули, то создаваемые этими модулями потери будут вносить свой вклад в значение F на входном кабельном разъеме усилительного устройства, и в результате действительное значение F будет хуже того значения F , которое определено в спецификации для самого

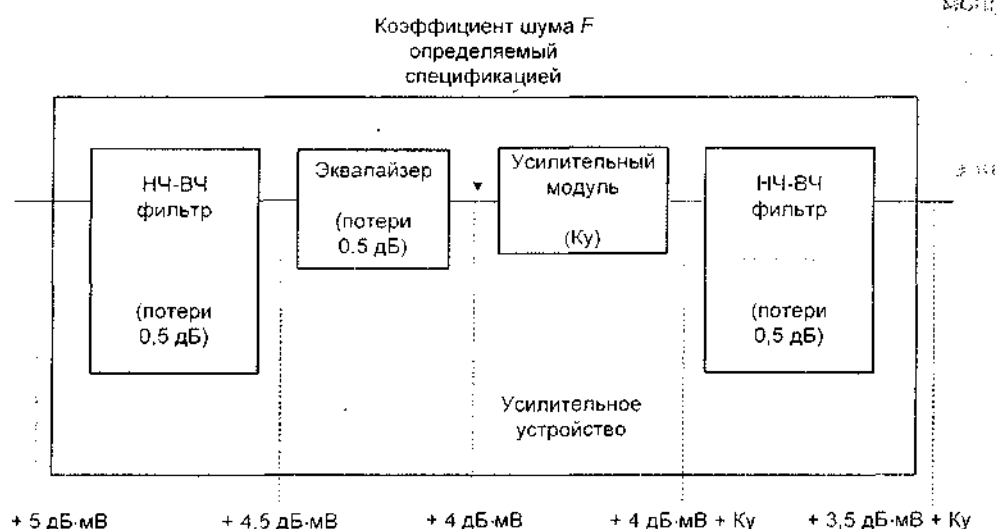


Рис. 10.11. Коэффициент шума усилительного устройства

Потери во внутренних дополнительных модулях усилителя необходимо учитывать. Если коэффициент шума задан для самого усилительного модуля, но используются пассивные модули, установленные на входе усилительного модуля, с общими потерями L (аттенюатор, эквалайзер, дуплексыры в двунаправленных усилителях), то результирующий коэффициент шума F_{Σ} будет равен сумме коэффициента шума усилителя F и потерь L :

$$F_{\Sigma} = F + L.$$

Это легко понять, если проследить изменение уровня сигнала в схеме на рис. 10.11. Предположим, что на входе усилительного устройства присутствует сигнал с уровнем +5 дБ·мВ. Сигнал испытывает от двунаправленного фильтра и от эквалайзера такое затухание, что его уровень на входе самого усилитель-

ного модуля равен +4 дБ·мВ. Если в спецификации усилительного модуля было определено, что на его входном разьеме F равен 9 дБ, то действительное значение C/N будет равно 54 дБ, а не 55 дБ, как было в предыдущем примере. Для каскада из данных устройств общее отношение C/N будет также на 1 дБ хуже.

Подобные ошибки могут привести к серьезным просчетам. Например, если ошибочно предположить, что F равен 9 дБ на входном разьеме усилительного устройства, то входной уровень сигнала в этой точке, заложенный нами в проект, был бы равен +5 дБ·мВ, и не учли бы ухудшение отношения C/N в окончательных точках системы на 1 дБ. С другой стороны, если все-таки необходимо обеспечить значение C/N 55 дБ на каждом усилителе, то следует создать на входе каждого усилительного устройства уровень сигнала +6 дБ·мВ, а не +5 дБ·мВ как показано на рис. 10.10. Перед использованием данных спецификации усилителя разработчик должен быть совершенно уверен в том, как эти данные были получены. Если в окончательном проекте системы предусмотрены двунаправленные фильтры, но эти фильтры первоначально не были установлены, то потери передачи на фильтрах должны быть учтены при расчетах шума в системе. Иначе при последующей установке фильтров значение C/N будет хуже, чем ожидалось. Очевидно, что разработчику системы очень важно правильно соотносить данные из спецификации конкретного оборудования с рабочими уровнями сигналов в системе.

С коэффициентом шума связан другой шумовой показатель усилителя, называемый *собственной шумовой мощностью* $P_{ш}$ (не путать с входной мощностью шума). Это мощность, создаваемая самим усилителем на выходе в полосе каждого ТВ канала. Шумовая мощность определяется коэффициентом шума F усилителя, шириной полосы видеосигнала Δf и эквивалентной шумовой температурой T_0 , которая в общем случае нелинейно зависит от коэффициента шума. Выражение для собственной шумовой мощности имеет следующий вид.

$$P_{ш} = kT_0\Delta f(F - 1).$$

Величина k , входящая в формулу для шумовой мощности, называется постоянной Больцмана и равна $1,38 \cdot 10^{-23}$. Средняя температура окружающей среды составляет 293 К. Полоса Δf для сигналов системы SECAM равна 5,75 МГц, для сигналов системы PAL она составляет 4,75 МГц. Стандартное сопротивление для коаксиальных сетей R_0 равно 75 Ом. Получаемая абсолютная величина мощности очень мала, она измеряется долями пиковатта (10^{-12}). Величина шумовой мощности учитывается, например, при расчете отношения сигнала к шуму, когда суммируются входная и собственная шумовые мощности. Другой полезный параметр – уровень собственного теплового шума широкополосного усилителя – определяется следующим выражением.

$$U_{ш} = \sqrt{P_{ш}R_0}.$$

Абсолютные шумовые параметры – шумовая мощность и шумовое напряжение усилителя редко приводятся в спецификации, но они косвенно (через коэффициент шума) определяют другой важнейший параметр, который использует разработчик в расчетах шума, а именно, выходное отношение C/N усилителя.

Приведенный динамический диапазон (выходное отношение сигнал/шум) является важнейшим комплексным шумовым параметром усилителя. Он показывает, чему равно отношение сигнала к шуму на выходе усилителя, и зависит от уровня входного сигнала, входной шумовой мощности и собственной шумовой мощности усилителя. Измеряется этот параметр на выходе усилителя с коэффициентом шума F , коэффициентом усиления K и уровнем собственного теплового шума $S_{ш0}$ при выходном уровне несущей $S_{вых}$, подаваемой от высокочастотного генератора с выходным сопротивлением 75 Ом. Тогда выходное отношение C/N будет определяться следующим выражением.

$$C/N_{\text{вых}} = S_{\text{вых}} - K - F - S_{ш0}.$$

Именно этот параметр (в совокупности с максимальным выходным уровнем) является определяющим при выборе усилителя. Приведенным динамическим диапазоном он называется потому, что выражает отношение входного уровня сигнала шуму, приведенное к выходу усилителя. Для получения большего значения выходного C/N необходимо выбирать усилитель с минимальными коэффициентами усиления и шума при как можно большем уровне входного сигнала. При этом следует учитывать, что при заданной длине магистрали применение усилителей с малым коэффициентом усиления приводит к увеличению их числа и, следовательно, удорожанию магистрального оборудования, хотя качество передачи при этом повышается. Чем шире полоса частот усилителя, тем шире должен быть его динамический диапазон или, иначе говоря, тем меньшим коэффициентом усиления он должен обладать при заданном уровне выходного сигнала. Меньшему коэффициенту усиления соответствует большая величина приведенного динамического диапазона. С приведенным динамическим диапазоном связано такое важное явление как накопление шумов в каскаде усилителей. Другими словами, величина приведенного динамического диапазона характеризует количество шумов вносимых активными устройствами которые могут которые могут быть накоплены в каскаде.

Развязка между прямым и обратным каналами (Downstream to Upstream decoupling) определяется избирательностью частотного дилексера (по ВЧ и по НЧ). Этот параметр особенно важен для предоставления в сети интерактивных услуг. Требование к избирательности по НЧ вытекает из условий обеспечения устойчивости (баланса фаз и баланса амплитуд) усилителя обратного канала, по отношению к которому усилитель прямого канала образует петлю положительной обратной связи. Если допустить, что коэффициент усиления в прямом канале не превышает 40 дБ, то ФНЧ должен обеспечивать избирательность не менее 20 дБ. Избирательность ФВЧ должна быть гораздо выше, поскольку требование к избирательности дилексера по ВЧ определяется необходимостью ограничения попадания продуктов интермодуляции с выхода усилителя прямого канала на вход усилителя обратного канала. Например, если избирательность ФВЧ будет составлять 25 дБ, то при рабочем выходном уровне усилителя прямого канала 105 дБ-мкВ и допустимой интермодуляции 60 дБ получим, что уровень помехи на входе усилителя обратного канала составит 20 дБ-мкВ. Это эквивалентно тому, что при входном уровне сигнала обратного канала 70 дБ-мкВ отношение сигнала к интермодуляционной помехе будет равно 50 дБ. Такие помехи в обратном канале абсолютно недопустимы. Практика показывает, что только значение 50 – 60 дБ является достаточной избирательностью ФВЧ.

10.3. Спецификация усилителя

Диапазон регулировки усиления (РУ), диапазон регулировки наклона (РН) и межкаскадный наклон являются существенными параметрами для возможности компенсации нежелательных или непреднамеренных отклонений уровня сигнала в кабельной системе, могущих повлечь ухудшение качества передачи. Различие между этими двумя параметрами состоит в том, что РУ задается для одной частоты, а РН задается для двух частот полосы передачи. Поддержание постоянного наклона АЧХ необходимо для компенсации разности затухания сигнала в кабеле на крайних частотах полосы. Отклонения уровня сигнала в кабеле объясняются чаще всего влиянием температуры внешней среды на электрические характеристики проводников. Чтобы усилитель был способен восстановить искаженный (повышенный или пониженный) уровень поступающего на его вход сигнала до нормативного значения, он должен обладать достаточным диапазоном регулировки. Существуют усилители со схемами ручной и автоматической регулировки усиления и наклона. Схемы АРУ и АРН автоматически поддерживают постоянный выходной уровень и наклон характеристики на выходе усилителя. Ручная регулировка коэффициента усиления и наклона выходной характеристики осуществляется с помощью перестраиваемых межкаскадных аттенюаторов и эквалайзеров, расположенных между ступенями усилительного устройства, выполненными на транзисторах и интегральных микросхемах. Назначение схем автоматической и ручной регулировки одно и то же – они позволяют в итоге свести к минимуму влияние изменения коэффициента усиления на обеспечиваемое отношение сигнал/шум и выходной уровень усилителя.

Дифференциальное усиление и дифференциальная фаза (Differential Gain, Differential Phase) являются показателями линейных искажений усилителя. Дифференциальное усиление выражается двумя величинами, которые представляют собой две пиковые амплитуды поднесущей относительно амплитуды поднесущей уровня черного цвета. Дифференциальное усиление вычисляют по максимальной и минимальной амплитуде ступенек специального испытательного сигнала на выходе демодулятора по осциллограмме дифференцированного сигнала, полученного на выходе измерительной дифференцирующей цепочки с постоянной времени 300 нс. Дифференциальная фаза выражается двумя величинами в градусах, которые представляют собой две пиковые фазы поднесущей относительно фазы поднесущей уровня черного цвета. Значение дифференциальной фазы вычисляют, как разность максимальной и минимальной фаз наложенного элемента E_1 в интервале уровней от черного до белого. Согласно EN 50083 в любом телевизионном канале максимальное дифференциальное усиление (от пика к пику) не должно быть более 14%, а максимальное дифференциальная фаза не должно быть более 12%.

Таблица 10.2

Параметры усилителей

Характеристика	WISI VX96	DXE 853 GA
Диапазон частот – прямого канала – обратного канала	47–862 МГц 4–30 МГц	47–862 МГц 4–30 МГц
Коэффициент усиления – прямого канала – обратного канала	33–35 дБ 19 дБ	40 дБ 22 дБ

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

Характеристика	WISI VX96	DXE 853 GA
Выходной уровень при CTB = 113 дБ·мкВ и CSO = 115 дБ·мкВ	124 дБ·мкВ	126 дБ·мкВ
Неравномерность АЧХ	1.2 дБ	1.6 дБ
Диапазон регулировки усиления	10 дБ	18 дБ
Диапазон регулировки наклона	8 дБ	15 дБ
Межкаскадный эквалайзер	10 дБ	8 дБ
Коэффициент шума	<6 дБ	7 дБ
Тип разъема	F	RG-11
Напряжение питания – дистанционное – местное	27-50 В 210-235 В	26-65 В 207-244 В
Рабочий диапазон температур	-40...+55 °С	-40...+55 °С
Потребляемая мощность	<19 Вт	21 Вт

К остальным параметрам относятся входное и выходное сопротивление, потребляемая мощность и напряжение питания, вес и габариты. Приведем для примера сокращенные спецификации двух усилителей – магистрального усилителя VX96 фирмы WISI и универсального усилителя DXE 853 GA фирмы Teleste (табл. 10.2). Параметры, приведенные в спецификации, не следует считать стандартными, поскольку они относятся к конкретным моделям усилителей. Оба усилителя имеют диапазон частот прямого канала 47 – 862 МГц и снабжены усилительным модулем обратного канала. Усилители комплектуются местным или дистанционным блоком питания. Дистанционное питание подается через любой сигнальный порт или встроенный ввод питания и может транслироваться в любом направлении. Усилитель VX96 предназначен для создания качественных магистральных участков. Он построен на основе двух гибридных микросхем. В качестве входной ступени установлена малошумящая Push Pull схема, а в качестве выходной ступени – мощная кремниевая или арсенид-галлиевая Push Pull или Power Double схема. Усилитель DXE 853 GA может применяться на магистральных и домовых распределительных участках кабельной сети и имеет два выхода, конфигурируемых путем установки ответвителей. Оба усилителя имеют межкаскадный регулируемый эквалайзеры и аттенюатор, заменяемые диплексерные фильтры, а также место для установки дополнительного эквалайзера и аттенюатора (эквивалента кабеля).

10.4. Выходная ступень усилительного устройства

В формировании качественного выходного сигнала большую роль играет выходная ступень усилительного устройства. Именно она отвечает за величину наиболее значимого параметра $S_{\text{вых max}}$ и должна обеспечить максимально возможное усиление при соблюдении вышеназванных требований к интермодуляционным искажениям во всей полосе частот, поэтому к выходной ступени предъявляются самые высокие требования по линейности амплитудно-частотной характеристики и малой неравномерности АЧХ. Для этого использу-

ется несколько различных дорогостоящих схемотехнических решений. Рассмотрим вкратце существующие варианты реализации выходной ступени усилительного устройства и их достоинства и недостатки.

В тех точках кабельной системы, где необходимо обеспечить очень высокую линейность (в больших каскадах магистральных сетей) применяются усилители с выходной ступенью, построенной по схеме с "прямой связью" или Feed Forward (FF). Эта схема характеризуется очень низкими искажениями, но она крайне чувствительна к перепадам температур и неприменима там, где требуется высокий выходной уровень. Стоимость этих усилителей, как правило, очень высока.

В двухтактных балансных схемах, называемых в зарубежной литературе Push Pull (PP) используются дорогие мощные широкополосные СВЧ транзисторы и миниатюрные сверхширокополосные ферритовые трансформаторы с малыми потерями. Достоинствами балансных схем по сравнению с традиционными схемами являются повышенный уровень выходной мощности (в идеальном случае на 3 дБ), пониженные интермодуляционные искажения второго порядка, повышенная надежность за счет резервирования в плечах, пониженный коэффициент шума, малый коэффициент возвратных потерь и низкая потребляемая мощность. Кроме этого в двухтактной схеме достигается независимость настроек входной цепи с точки зрения минимизации коэффициента шума и максимизации коэффициента усиления, слабая зависимость усиления от колебаний температуры, малая неравномерность АЧХ за счет использования простейших диссипативных выравнивающих цепей. Линейность этих схем несколько хуже, чем схем FF. Многочисленные преимущества балансных схем и падение их стоимости в последнее время привели к массовому их использованию при производстве усилителей. Максимальный выходной уровень усилителей с выходной балансной ступенью составляет около 120 дБ-мкВ при СТВ = 60 дБ. Такие усилители могут использоваться в домовых распределительных сетях и в магистральных в качестве последнего усилителя в каскаде.

Стоит заметить, что двухтактные балансные схемы почти повсеместно используются в современных усилителях, поэтому дальнейшее улучшение характеристик выходной ступени шло по пути того или иного совершенствования балансной схемы и все последующие модификации обладают теми же достоинствами, но в большей степени. Следующим шагом в повышении качества балансной схемы стало создание балансной схемы с удвоением мощности, которая в зарубежной литературе носит название Power Double (PD). Схема построена по такому же принципу, но ее теоретический максимальный выходной уровень превышает аналогичный уровень усилителей типа PP на 3 дБ (практически на 2 – 2,5 дБ за счет потерь в направленных ответвителях) и обычно составляет 121 – 123 дБ-мкВ при СТВ = 60 дБ. К недостаткам этой схемы можно отнести более высокое, чем у PP, энергопотребление. Такие усилители также могут использоваться в магистральных и домовых распределительных сетях.

Схема, обеспечивающая еще более высокий выходной уровень (на 2,5 дБ, чем PD) при практически той же линейности называется Quattro Double (QD), однако, потребляемая ею мощность еще выше. Такие усилители используются в основном в домовых распределительных сетях.

С целью дальнейшего повышения линейности усиления в схемах PP и PD выходных ступеней вместо кремниевых транзисторов стали устанавливать бо-

Глава 10. Усилительное оборудование коаксиальных систем

лее дорогие арсенид-галлиевые (GaAs) транзисторы, обладающие более широким динамическим диапазоном. При этом использовать схему Дарлингтона с динамической нагрузкой. Усилители, выполненные по данной схеме, оптимизированы для использования в сетях с передачей цифровых ТВ сигналов. Они имеют очень высокую линейность в диапазоне 47 – 600 МГц и более низкую в диапазоне 600 – 862 МГц. Кроме того, они характеризуются низкой потребляемой мощностью и высоким выходным уровнем. Максимальный выходной уровень таких усилителей составляет около 125 дБ-мкВ. Усилители данного типа используются преимущественно в магистральных сетях. Использование усилителей с выходными каскадами PP и PD позволяет существенно снизить уровень интермодуляционных продуктов.

Перед установкой в кабельную сеть усилитель необходимо настроить. Ручная настройка усилителя должна выполняться в соответствии с его рабочими характеристиками, указанными в документации (спецификации рабочих параметров). Настройка усилителя осуществляется при помощи встроенных аттенюаторов и эквалайзеров, расположенных на плате усилителя. Аттенюатор предназначен для регулировки усиления (РУ), а эквалайзер используется для регулировки наклона (РН). При расчете и настройке усилителей необходимо соблюдать требования по максимальному выходному уровню при определенном числе транслируемых каналов. Желательно выполнять настройку по сигналам тех частот полосы, для которых были измерены приведенные в спецификации значения выходного уровня и нелинейных искажений. В противном случае потребуются перерасчет для каких-либо двух крайних частот полосы системы, например, частот 50 и 860 МГц. Настройка начинается при минимальном затухании, установленном регулятором уровня с помощью аттенюатора и регулятором наклона с помощью эквалайзера. Затем аттенюатором устанавливается расчетный выходной уровень на верхней частоте, а потом эквалайзером устанавливается расчетный выходной уровень на нижней частоте. При необходимости эти операции повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто нужное соотношение. Следует заметить, что при увеличении наклона АЧХ выходной уровень может быть увеличен, как показано в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Регулировка выходного уровня

Число ТВ каналов	Наклон АЧХ, дБ	Максимальный выходной уровень, дБ-мкВ
30	0	105,5
30	6	108,1
40	0	103,9
40	6	106,4
60	0	102,6
60	6	105,4
80	0	100,7
80	6	103,6

Регулировка усиления осуществляется с целью поддержания его расчетного выходного уровня обеспечивающего заявленный уровень интермодуляционных искажений. Из-за жестких требования к линейности усилителя электронные аттенюаторы на диодах или транзисторах, которые являются дополнительными источниками нелинейных искажений, в настоящее время практически не используются. Вместо них применяются Т-образные или П-образные аттенюаторы, параметры которых рассчитываются исходя из требуемой величины ослабления при сопротивлении 75 Ом.

Резюме

Все усилители коаксиальных кабельных систем передачи можно условно разделить на устройства, предназначенные для каскадирования на протяженном маршруте, и устройства, предназначенные для усиления сигнала в распределительных кабельных ответвлениях ограниченной протяженности, хотя существуют и универсальные устройства, способные выполнять те и другие функции. Усилители первого типа называются магистральными, а усилители второго типа называются домовыми или распределительными. Несмотря на разнообразие конфигураций усилительных устройств, все состоят из небольшого числа основных блоков, имеющих идентичные функции. Этими блоками являются усилительный модуль (отдельно для прямого и обратного каналов), эквалайзер, аттенюатор, дуплексерный фильтр, блок питания и, возможно, делитель сигнала. Наибольшее внимание в структуре усилительных устройств уделяется выходной ступени. В большинстве конфигураций усилительное устройство включает наряду с собственно усилительным модулем несколько дополнительных модулей, каждый из которых вносит свои потери. Различие между усилителями разных типов заключается в составе блоков и их качественных характеристиках. Магистральные усилители должны иметь очень высокие показатели качества, поскольку без этого было бы невозможно создание магистрали большой протяженности, и устройства автоматической регулировки усиления и наклона. Для повышения качества передачи магистральные усилители строятся по ступенчатой схеме, в которой на входную ступень возлагается ответственность за наибольшее отношение C/N , а на выходную ступень – за наибольшее усиление при наименьших показателях нелинейных искажений. Среднее число усилителей в коаксиальной магистрали составляет 8 – 9. К домовым усилителям предъявляются менее высокие требования по качеству передачи и они могут включать только одну ступень усиления и устройства ручной регулировки усиления. Максимально допустимое число домовых усилителей в распределительном магистральном ответвлении составляет не более 3 (обычно 2).

Параметры, которые должны быть приведены производителем в спецификации усилительного устройства, перечислены в стандарте EN-50083. Используя эти параметры в расчетах, разработчик должен понимать, как они были получены и как они связаны между собой усилительного модуля.

Глава 11

АКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Технология оптической передачи является относительно новой по сравнению с технологией передачи по коаксиальному кабелю и в настоящее время уверенно и активно завоевывает позиции в сфере телекоммуникаций. Это в особенности относится к созданию больших телекоммуникационных систем с интеграцией услуг, где просто невозможно обойтись без использования оптики на транспортных или магистральных направлениях по причине высоких требований к качеству передачи. В настоящее время производится целый спектр оборудования и кабеля для оптических систем передачи. К этому оборудованию относятся головные станции с оптическими передатчиками, оптические приемники и различные вспомогательные оптические приборы, предназначенные для мультиплексирования и демупльтиплексирования сигналов, ответвления сигналов, фильтрации и других целей. С их помощью система передачи конфигурируется нужным образом для условий конкретного проекта. В главе, посвященной пассивному оборудованию, уже были рассмотрены некоторые из оптических устройств. В этой главе рассмотрены классификация и устройство активного оборудования оптических систем. Заранее скажем, что активное оптическое оборудование в большинстве случаев нельзя сопоставлять по характеристикам с активным оборудованием коаксиальных систем передачи, так как эти два типа оборудования предназначены для разных архитектурных уровней системы КТВ, т.е. имеют разные области применения. Оптическое оборудование предназначено для транспортного и магистрального уровней, а коаксиальное – для магистрального и домового уровней.

11.1. Особенности оптической системы передачи

К активному оборудованию оптических систем передачи относятся оптические передатчики, оптические приемники, оптические усилители (репитеры) и активные ответвители. Рабочая длина волны активного оборудования должна соответствовать длине волны используемого волокна. При этом нельзя забывать о том, что, ширина полосы зависит от протяженности линии передачи. В настоящее время в активном оборудовании используются все три длины волны: 850 нм, 1310 нм и 1550 нм. Оборудование на 850 нм по-прежнему широко используется из-за низкой стоимости излучателей этой длины волны. Одномодовое оборудование на 1550 нм предназначено для протяженных линий высокого качества передачи длиной более 50 км. Волна 1310 нм является промежуточным по цене и качеству вариантом и, поэтому, наиболее популярным. По всем характеристикам лучшим решением является использование одномодовых волокон и, следовательно, одномодового активного оборудования, хотя многие модели многомодового активного оборудования совместимы с обоими типами волокна. Стоимость одномодового волокна может быть гораздо выше.

Одна из существенных особенностей оптической системы заключается в возможности передачи сигнала на очень большое, по сравнению с коаксиальной системой, расстояние без усиления. Таким образом, в классической схеме оптической системы должен присутствовать только источник оптического излучения, оптический канал передачи и детектор оптического излучения. Однако, оптическая система не используется обособлено. На ее вход подается электрический сигнал головной станции, а к ее выходу, как правило, подключается коаксиальная система передачи. Поэтому источник является преобразователем электрической энергии в оптическую, а детектор является преобразователем оптической энергии в электрическую. Таким образом, оптический источник является своеобразным модулятором, переносящим электрический сигнал на несущую частоту оптического диапазона для передачи по волокну, а оптический детектор – демодулятором, выполняющий обратное преобразование частоты. Такой принцип используется в аналоговых оптических системах. В цифровых оптических системах, кроме этого, сигнал перед подачей на модулятор кодируется определенным методом для представления сигнала в виде последовательности импульсов, а на приемной стороне, соответственно, декодируется. Комбинация оптического источника с различными электрическими устройствами усиления и преобразования сигнала называется оптическим передатчиком, а комбинация оптического детектора с аналогичными электрическими устройствами на приеме называется оптическим приемником. В качестве источника и детектора оптического излучения используются различные полупроводниковые приборы, а оптический канал организуется с помощью одномодового или многомодового оптического волокна.

Оптический передатчик является одним из элементов центральной головной станции, а оптический приемник является основным элементом узловой (подголовной) станции. Оптические приемники монтируются в специально оборудованных помещениях и также снабжаются питанием, как и обычные высокочастотные усилители. Жесткое ограничение на количество широкополосных усилителей в каскаде распределительной сети (не более трех) объясняется требованиями к суммарным искажениям на выходе распределительной сети при условии включения достаточно большого числа усилителей в магистральном каскаде. В системах с оптической магистралью ситуация становится проще. Если магистральная сеть проектируется на основе оптического волокна, то распределительные усилители могут обеспечивать высокое усиление и распределительная сеть в целом может обслуживать более широкую зону покрытия благодаря тому, что количество источников шума и интермодуляции в системе мало (один оптический передатчик, один оптический приемник и три распределительных усилителя). Поскольку количество приборов мало, вклад каждого из них в общий шум и интермодуляцию может быть чуть большим.

Оптический усилитель, согласно определению стандарта EN 50083, это прибор для направленного усиления оптических сигналов. Он состоит из соединителей и активной среды, которая усиливает оптический сигнал без демодуляции. Оптические усилители первого поколения были основаны на преобразовании света в электрический сигнал, усилении его в электрическом виде и обратном преобразовании в свет. Каждая из этих трех операций вносит свою долю шума и искажений, что резко снижало качество передачи. Появление оптических усилителей на основе легированных эрбием световодов, коэффицици-

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

ент усиления которых может достигать 30 дБ, открыло новые возможности для построения систем оптической связи. Однако, усилители в оптических линиях кабельного телевидения используются редко, поскольку в этом, как правило, нет необходимости. Современные оптические волокна обладают высочайшим качеством передачи, например, одномодовое волокно с рабочей длиной волны 1550 нм позволяет передать сигнал на расстояние более 50 км. Для создания транспортной или магистральной линии передачи сети КТВ этого более чем достаточно. Действительная потребность в оптическом усилении возникает на транспортных линиях глобальных телекоммуникационных сетей, протяженность которых достигает сотен и тысяч километров. Примерами являются трансатлантическая линия ТАТ-8 (США – Европа), тихоокеанская линия ТРС-3 (США – Гавайские острова – Япония), глобальное оптическое кольцо Япония – Сингапур – Индия – Саудовская Аравия – Египет – Италия.

Системы передачи, в которых сигнал передается как по оптическому волокну, так и по коаксиальному кабелю с усилением, называются гибридными. Общие термины, используемые в тех и других сегментах гибридной системы для определения шума и интермодуляции, позволяют методом комбинирования находить показатели качества передачи во всей системе. Большинство систем кабельного телевидения, в настоящее время являются широкополосными. Поскольку оптические системы как высокочастотные коаксиальные системы, могут использовать и цифровую модуляцию, и аналоговую, можно постепенно включать оптические звенья в существующую коаксиальную систему кабельного телевидения для увеличения ее полосы пропускания. В действительности эволюция кабельных систем в сторону гибридных систем, включающих оптические и электрические звенья, кажется довольно естественным продолжением развития систем аналоговой передачи. В случае аналоговой передачи будем проектировать оптическую систему почти тем же образом, что и обычную коаксиальную широкополосную систему. Необходимо рассчитать эффективную ширину полосы оптической системы передачи так, чтобы она была совместима с любым коаксиальным расширением. При этом нужно учитывать линейность характеристик активных приборов, так как это напрямую связано с величиной вносимых этими приборами интермодуляционных искажений. Кроме того, мы, как и раньше, должны учитывать все прочие шумы, которые обычно вносятся терминальным оборудованием.

Оптическое оборудование устанавливается в тех точках гибридной системы, где заканчивается или начинается передача оптического сигнала. Такие точки являются либо окончаниями собственно оптической системы передачи, либо промежуточными точками, находящимися на стыках с коаксиальными звеньями передачи, где требуется переход от оптического сигнала к электрическому. В состав терминального активного оборудования входят устройства двух категорий: электрооптические и чисто электронные. К электрооптическим относятся те приборы, на вход которых подается электрический сигнал, а с выхода снимается оптический сигнал, а также те приборы, на вход которых подается оптический сигнал, а с выхода снимается электрический сигнал. Электрооптическими приборами, используемыми в оптической системе передачи, являются лазерные или светоизлучающие диоды и фотодетекторы различных видов. К электронным компонентам терминального активного оборудования относятся те приборы, которые работают только с электрическим сигналом, например,

радиочастотные широкополосные усилители. Обычно в одном блоке обеспечиваются функции обоих компонентов.

Задача проектирования гибридной системы и, в частности, оптической линии решается также в терминах потерь и уровней передачи. При этом стоит обращать внимание не только на качество волокна, но и на качественные характеристики активного оборудования. Оптимальные показатели эффективности детектирования при большой скорости цифрового потока или при большой протяженности системы имеют диоды APD, которые наиболее чувствительны к слабому входному оптическому сигналу. Высокая стоимость и сложность этих приборов может быть в значительной мере компенсирована отсутствием необходимости в дорогих промежуточных оптических репитерах. Однако, на тех расстояниях передачи, которые обычно встречаются в распределительных системах кабельного телевидения, репитеры вообще редко бывают необходимы, а особенности их характеристик не позволяют сделать однозначный вывод о том, что использование этих приборов является удачным решением в любом случае. В случае невысокой скорости передачи, примерно до 50 Мбит/с, даже при использовании многомодового волокна, обладающего значительной модовой дисперсией система передачи не будет иметь строгих ограничений по ширине полосы, пока длина волокна не превысит примерно 40 км. В таком случае значения времени нарастания оптического источника и детектора становятся несущественными. Система со светоизлучающим диодом в качестве источника и pin-диодом в качестве детектора в этих условиях функционирует вполне удовлетворительно. При повышении скорости передачи в первую очередь возникают ограничения по затуханию сигнала. Если установлена длина соединительного волоконно-оптического кабеля или потери в нем, то способом борьбы с потерями остается обеспечение адекватного светового потока от источника в направлении приемника, а также использование более чувствительного детектора на APD. Также можно выбрать волокно с меньшими потерями или с другой рабочей длиной волны или рассмотреть в качестве альтернативного варианта комбинацию лазерного источника и PIN-диода вместо LED-источника и APD-диода.

Стоит сказать несколько слов о тех технологиях, которые применяются в волоконно-оптических линиях передачи. Хотя в оптических линиях применяются и аналоговые, и цифровые технологии передачи, главным образом, они ориентированы на цифровую передачу сигнала, поскольку это позволяет использовать все преимущества оптического волокна как среды передачи и значительно повысить скорость и качество передачи. При аналоговой передаче применяется стандартная процедура частотного мультиплексирования каналов, доставшаяся в наследство от коаксиальных магистралей. При цифровой передаче в разное время применялось три способа. Первый, появившийся в начале 80-х годов, был основан на временном мультиплексировании по технологии PDH (плезиохронной цифровой иерархии). Этот способ применялся в первых цифровых магистралах, которые были тогда коаксиальными, а сейчас применяется все реже. Вторым способом цифровой передачи, также основанный на временном мультиплексировании, использует технологию SDH (синхронной цифровой иерархии). Этот способ получил распространение в начале 90-х годов и широко применяется по сей день. Третьей технологией передачи по оптическому волокну является наиболее новая и перспективная технология волнового мультиплексирования WDM. Пока она распространена недостаточно широко, возможно, в силу сложности оборудования. Различные сетевые службы используют интерфейс физического уровня

модели OSI, предоставляемой им транспортной технологией TDM или WDM. Подробнее технологии передачи в оптическом звене рассматриваются в гл.17.

11.2. Характеристики оптического оборудования

К характеристикам оптической системы передачи затухание сигнала в оптическом волокне, полоса пропускания волокна и активного оборудования, бюджет активного оборудования (динамический диапазон), уровень оптической мощности на входах и выходах активного оборудования, ширина полосы и рабочая длина волны, величина искажений, возникающих вследствие дисперсии в волокне и нелинейных эффектов в активном оборудовании. Рассмотрим подробнее некоторые, наиболее важные характеристики активного оптического оборудования.

Центральная длина волны и спектральная полоса источника

Центральной длиной волны называется среднее значение длины волны, при котором достигается амплитуда источника света или относительно которого наблюдается снижение максимальной амплитуды до половинного значения. Спектральной шириной полосы называется разница в длинах волн, при которой достигается амплитуда источника света или между которыми наблюдается снижение максимальной амплитуды до половинного значения. Эти величины выражаются в нм. Обе величины измеряются для передатчика как в отсутствие модуляции, так и в режиме модуляции. Если измеряется цифровой передатчик, то он должен быть модулирован псевдослучайной битовой последовательностью (PRBS) длиной не менее 2^{15} символов с точно определенной частотой повторения импульсов, шириной импульса и заданным коэффициентом затухания. Аналоговые передатчики должны быть модулированными, по крайней мере, одной несущей при фиксированном оптическом индексе модуляции. Используя оптический анализатор спектра, измеряют уровень мощности, соответствующий наибольшему значению спектральной мощности. Центральная длина волны вычисляется как среднее арифметическое крайних длин волн полосы, а спектральная ширина вычисляется как разность этих длин волн. Измеряют также *неравномерность* характеристики оптического передатчика и приемника в спектральной полосе в дБ.

Линейная полоса и частотное смещение одномодовых источников

Линейной полосой называется спектральная ширина полосы отдельной моды лазера. Она определяется как разница между теми ближайшими частотами, на которых наблюдается снижение максимальной амплитуды спектра источника до половинного значения. Частотное смещение вызвано частотной модуляцией интенсивности лазерного диода. Частотное смещение эффективно расширяет спектральную полосу частот лазера. Благодаря дисперсии волокна составляющие спектрального потока на различных скоростях способствуют образованию гармонического искажения передаваемого сигнала. Линейная полоса выражается в МГц/мА. Частотное смещение вычисляется из выражения:

$$C = \Delta f \frac{Z}{U_{\text{Вых}}},$$

11.2. Характеристики оптического оборудования

где C – частотное смещение; Δf – полоса частот; Z – входной импеданс оптического передатчика, $U_{\text{вых}}$ – выходной уровень сигнала.

Полоса пропускания и время нарастания

Ширина полосы, как отдельного блока оборудования, так и системы передачи в целом, измеряется в герцах по уровню половинной мощности аналогового сигнала, т.е. по уровню, который на 3 дБ ниже максимального. Это значит, что в полосе пропускания данного блока или системы ни один сигнал не затухает сильнее, чем на 3 дБ по сравнению с сигналом наибольшей амплитуды, затухание которого минимально. Полоса активного оборудования определяется отдельно от волокна по параметру, называемому *временем нарастания* (*rise time*). Время нарастания определяется как время, необходимое для увеличения мгновенного значения амплитуды импульса от 10 до 90 процентов пикового значения амплитуды, и характеризует быстродействие активного оборудования. Следовательно, пропускная способность (или полоса пропускания) активного оборудования может быть определена по его амплитудно-частотной характеристике по уровню 3 дБ, либо рассчитана через время нарастания.

Измерение ширины полосы оптического волокна имеет свои особенности. Дело в том, что в общем случае полоса передачи, предоставляемая оптическим волокном, зависит от его длины, поскольку изменение длины волокна изменяет его оптические свойства, а также от уширения импульса. Уширение импульса происходит в волокне вследствие дисперсии (см. гл. 9). Величины уширения импульса и полосы пропускания оптического волокна связаны однозначной зависимостью – полоса пропускания является величиной, обратной уширению. Полосу пропускания волокна можно определить через параметр, называемый широкополосностью, который показывает, какую ширину полосы имеет волокно длиной в 1 км (измеряется в МГц·км). Очевидно, чем больше расстояние передачи (длина волокна), тем меньше будет доступная для передачи полоса. В одномодовом волокне ширина полосы является линейной функцией от длины волокна. Например, одномодовое волокно, для которого широкополосность определена значением 250 МГц·км, при длине 5 км будет обеспечивать для передачи сигнала полосу, ширина которой составляет 50 МГц:

$$\Delta f = 250/5 = 50 \text{ МГц.}$$

И наоборот, если хотим передать сигнал, полоса которого составляет 50 МГц, на расстояние 5 км, то должны взять волокно с параметром широкополосности 250 МГц·км:

$$\Delta f = 50 \cdot 5 = 250 \text{ МГц·км.}$$

В многомодовом волокне полоса передачи зависит от длины волокна нелинейно из-за дисперсии. Когда в волокне распространяется несколько мод, каждая из них ведет себя как относительно независимый канал передачи из-за статистической природы механизма многомодового распространения. Поэтому, полоса передачи определяется тем, насколько различаются времена распространения отдельных мод. Так, например, эффективная длина многомодового волокна длиной 5 км при полосе сигнала 50 МГц составляет 3,62 км. Эффективная длина волокна всегда меньше его действительной длины и, поэтому, для передачи сигнала с полосой 50 МГц на расстояние 5 км широкополосность волокна должна быть больше, чем 250 МГц·км.

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

Понятие уширения удобно использовать в цифровых системах для оценки искажений выходного импульсного сигнала. Если характеристики элементов системы даны в терминах уширения и времени нарастания Δt , можно вычислить общее уширение Δt_{Σ} всей системы как среднеквадратическое значение отдельных ее элементов (квадратный корень из суммы квадратов времени нарастания передатчика, уширения импульса в волокне и времени нарастания приемника). Однако характеристики некоторых элементов системы производители определяют только в терминах полосы пропускания, не приводя значения времени нарастания и уширения импульса. Это гораздо удобнее с точки зрения проектирования оптической линии. В этом смысле оптическая система не отличается от обычной коаксиальной, где полосы пропускания всех элементов, включая усилители, ответвители и делители, должны удовлетворять требованиям к полосе системы в целом. Активное оборудование должно иметь ширину полосы, большую полосы пропускания волокна или, иначе говоря, время нарастания должно быть меньше уширения импульса на величину технологического запаса. В табл. 11.1 показано соотношение времени нарастания активного оборудования и ширины полосы в цифровых каналах с различными скоростями передачи.

Таблица 11.1

Время нарастания и ширина полосы

Время нарастания, нс	Ширина полосы, МГц	Скорость передачи, Мбит/с
453	0,77	1,544
222	1,58	3,152
110	3,16	6,312
15,6	22,38	44,736
7,76	45,07	90,148
5,16	67,77	135,532
2,55	137,09	274,176

Оптическая мощность

На измерении оптической мощности базируются измерения следующих параметров оптической системы передачи:

- потери волокна, соединителей, мультиплексоров и оптических изоляторов;
- усиление оптических усилителей;
- направленность оптических разветвителей;
- развязка оптических изоляторов, мультиплексоров и оптических ответвителей.

Оптическая мощность измеряется в дБм.

Оптический индекс модуляции

Этот термин в основном используется для аналоговых систем. Измеряется оптический индекс модуляции мощности передатчика на канал. Оптический индекс модуляции вычисляется следующим образом:

$$m = \frac{\sqrt{2}}{RI} U,$$

11.2. Характеристики оптического оборудования

где I – показание амперметра постоянного тока; U – показание селективного вольтметра (анализатора спектра); R – входной импеданс селективного вольтметра.

Оптический коэффициент возвратных потерь

Для оптических систем также определяется коэффициент возвратных потерь. Отражение передаваемого света имеет место на границе двух различных диэлектрических материалов. Оптический коэффициент возвратных потерь – это коэффициент отражения, который является отношением падающей оптической мощности к отраженной оптической мощности, выраженным в дБ. Коэффициент возвратных потерь измеряется для всего оптического оборудования, а не только активного. Метод измерения описан в стандарте EN-50083. Если испытуемый прибор имеет более одного порта, то все другие порты, не задействованные в измерении, должны быть соединены с согласованными нагрузками, имеющими очень низкий коэффициент отражения.

Поляризация и поляризационная стабильность источника

Поляризация определяется как проекция электрического вектора на плоскость, перпендикулярную направлению распространения поляризационной световой волны. Поляризационная стабильность должна выражаться как логарифмическое отношение в дБ максимальной амплитуды к минимальной амплитуде на выходе прибора, когда поляризация на входе изменяется между 0 и 360 градусами.

Когерентное время и когерентная длина

Когерентным временем является время, которое необходимо свету для прохождения когерентной длины. Когерентное время находится как величина, обратная линейной полосе. Обе величины используются для определения фазовой стабильности источника света.

Выходная мощность насыщения оптического усилителя

Эта величина находится через измерение усредненной выходной оптической мощности тестового волокна, удаленный конец которого подключается к выходной оптической части насыщенного оптического усилителя. Выходная оптическая мощность насыщения выражается в дБм. При низких уровни выходной мощности наблюдается лучшая линейность характеристики, следовательно, при увеличении выходного уровня необходимо будет понизить усиление. Насыщенной выходной мощностью считается выходная мощность, которая ниже экстраполированной линейной величины на 3 дБ.

Чувствительность оптического приемника по напряжению

Это отношение приращения выходного напряжения к соответствующему приращению оптической мощности. Чувствительность по напряжению r_U выражается в В/Вт и определяется следующим выражением:

$$r_U = \frac{\sqrt{2}}{mP} U_{\text{вых}}$$

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

где m – оптический индекс модуляции; P – принимаемая оптическая мощность; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение.

Дальность действия

Современные источники излучения, в качестве которых используются оптические квантовые генераторы, позволяют получить узконаправленное и когерентное световое излучение, затухание которого в волокне, обеспечивающем высокую направленность луча, весьма мало. Кроме возможности передачи света на очень большие расстояния без усиления это позволяет детектировать световой сигнал в точке приема с меньшим количеством ошибок. Затухание и дисперсия сигнала в волокне определяет возможную дальность передачи. Таким образом, дальность действия приемопередающих устройств зависит от качества волокна, используемого в линии связи. Обычно те значения дальности передачи, которые приводят производители в спецификации своих оптических передатчиков, не учитывают характеристики различных типов волокна, а рассчитаны для волокна наивысшего качества. Бюджет активного оборудования должен превышать затухание в волокне на некоторую величину технологического запаса.

Далее отдельно рассмотрим показатели, характеризующие шум и искажения в оптических системах передачи.

11.3. Шумы и искажения в оптических системах

Очевидное преимущество использования единой терминологии для оптических систем и широкополосных коаксиальных систем в том, что разработчик может создавать гибридные системы передачи, комбинируя оптические и коаксиальные звенья. В предыдущих главах уже было показано, как рассчитываются показатели сложной системы путем комбинирования показателей качества (шума и интермодуляции) отдельных ее элементов, таких как головная станция и кабельная сеть или транковая структура и фидерная структура. Таким же элементом является и оптическое звено.

Некоторые формы искажений присущи всем системам передачи, независимо от их структуры и используемой технологии, а другие формы относятся к индивидуальным особенностям системы. Поскольку оптические системы могут создаваться и использоваться как для цифровой, так и для аналоговой передачи, термины, применяемые в том и другом случае для определения шума и искажений, могут принципиально различаться. Некоторые виды искажений присущи только цифровой передаче и это отражается в специальных терминах. Например, качество цифровых оптических приемников и передатчиков характеризуется временем нарастания. Качество цифровой передачи, конечно, определяется обоими временами нарастания. Однако, в аналоговой передаче эта характеристика отсутствует. Производители оптического оборудования для аналоговой передачи используют в спецификациях те же характеристики, что и для коаксиальных кабельных систем. Например, оптический передатчик характеризуется собственным вносимым шумом и продуктами интермодуляции комбинационных частот при заданном количестве передаваемых телевизионных сигналов с установленным выходным уровнем оптического сигнала. Используя эти “аналоговые” характеристики, можно довольно легко вычислить окончательные

показатели качества передачи в гибридной системе, которая включает протяженные волоконно-оптические участки и короткие коаксиальные участки.

Рассмотрим сначала показатели качества передачи широкополосных аналоговых оптических систем с частотным мультиплексированием, т.е. шумы и искажения, вносимые активным оборудованием. Основными показателями шума при данном уровне входного сигнала являются коэффициент шума прибора F и выходное отношение C/N , а показателями нелинейных искажений являются СТВ, CSO и CSM. Кроме этого, определяется ряд других показателей, характерных для оптического оборудования.

Коэффициент шума (NF). Определение коэффициента шума активного прибора было дано в гл. 5. Справедливо оно и здесь. Напомним, что коэффициентом шума является отношение показателя C/N на входе к показателю C/N на выходе активного прибора в предположении того, что входная несущая свободна от шума. Другими словами, коэффициентом шума является отношение шумовой мощности на выходе реального активного прибора к шумовой мощности в той же точке идеального прибора (не создающего шумов).

Коэффициент шума является безразмерной величиной и выражается в дБ.

Коэффициент шума оптического усилителя может быть определен из выражения:

$$F = 10 \lg \left(\left(\frac{m^2}{2\Delta f \cdot 10^{0,1C/N_{\text{вх}}}} - \frac{m^2}{2\Delta f \cdot 10^{0,1C/N_{\text{вх}}}} \right) \frac{P_{\text{вх}}}{2h\nu} + \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \right),$$

где m – оптический индекс модуляции; $P_{\text{вх}}$ – оптическая входная мощность усилителя; $P_{\text{вых}}$ – оптическая выходная мощность усилителя; $C/N_{\text{вх}}$ – отношение несущая/шум оптического передатчика; h – постоянная Планка; ν – частота светового сигнала; Δf – полоса пропускания.

Относительная интенсивность шума (RIN). Эта величина является отношением среднеквадратической интенсивности флуктуации оптической мощности источника света к среднеквадратичной оптической выходной мощности. Величина RIN может быть вычислена по результатам измерения C/N для системы.

Шумовая эквивалентная мощность (NEP). Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника. NEP выражается в единицах Вт/Гц². Наряду с этой характеристикой измеряется еще *эквивалентный шумовой ток* как входной шумовой ток, подаваемый на вход нешумящего прибора и создающий на выходе шумовой ток, равный наблюдаемому на выходе рассматриваемого прибора. Измеряется эквивалентный шумовой ток в единицах А/Гц².

Отношение несущая/шум оптических передатчиков и приемников. Определение этой величины было дано в гл. 5. Отношение C/N аналоговой передающей системы при данном входном уровне сигнала ухудшается собственными внутренними источниками шума активного оборудования. В оптических системах как передатчик, так и приемник вносят шум в систему. Из-за разных видов сигналов прямое измерение отношения C/N передатчика и приемника в отдельности, является невозможным, поэтому индивидуальные данные для них рассчитываются из измерения C/N_{Σ} всей системы, при котором используется приемник с известным вносимым шумом для получения шума передатчика и наоборот. В силу того, что шумовое поведение PIN-диодного приемника хоро-

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

шо известно, он может использоваться как калиброванный приемник. Его шум складывается из дробового шума PIN-фотодиода и нормального теплового шума следующего за ним радиочастотного усилителя. Отношение C/N_{PIN} этого приемника может быть вычислено следующим образом:

$$C/N_{PIN} = 10 \lg \frac{m^2 P_0^2 r^2}{2 \Delta f (2 e r P_0 + I_r^2)},$$

где m – оптический индекс модуляции; P_0 – оптическая мощность на фотодиоде; r – чувствительность фотодиода; Δf – полоса пропускания; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ (заряд электрона); I_r – эффективная спектральная плотность шумового тока усилителя.

Затем, по результату измерения C/N_{Σ} оптического звена и вычисленному значению C/N_{PIN} находится передатчика C/N_{TR} через известное соотношение для показателя системы, приведенное в гл. 5:

$$C/N_{TR} = -10 \lg (10^{-0,1 C/N_{\Sigma}} - 10^{-0,1 C/N_{PIN}}).$$

Отношение C/N одномодовых оптических приемников на длине волны 1550 нм в среднем выше, чем на длине волны 1310 нм, при одних и тех же входной оптической мощности, ширине полосы и оптическом индексе модуляции.

Композитные искажения второго порядка передатчика (CSO). Определение этой величины было дано в гл. 6. Определение CSO прежде всего имеет силу для электрических усилителей, но также применяется для приборов с оптическим выходом. В данном случае это связано с электрическими сигналами, которые модулируют свет. Измеряется CSO оптического передатчика, модулированного множеством несущих.

Тройные композитные биения передатчика (CTB). Определение этой величины было дано в гл. 6. Это определение применяется и здесь. В данном случае это связано с электрическими сигналами, которые модулируют свет. Измеряется CTB оптического передатчика, модулированного множеством несущих.

Композитная кроссмодуляция передатчика (СХМ). Определение этой величины было дано в гл. 6. Это определение применяется и для приборов с оптическим выходом. Здесь это связано с электрическими сигналами, которые модулируют свет. Измеряется композитная кроссмодуляция оптического передатчика, модулированного множеством несущих. Заметим, что здесь применяется свой метод измерения, поскольку метод, использовавшийся для активного коаксиального оборудования, является непригодным для оптического оборудования.

Искажения в цифровых системах. Разнообразие форм искажений в цифровой оптической системе обязано особенностям передачи цифрового сигнала через оптическое волокно. К ним относятся дисперсия (или уширение импульса), время нарастания, межсимвольная интерференция. Эти искажения до некоторой степени ограничивают полосу оптической системы передачи. Обычно эти показатели не определяются отдельно, а в виде системного показателя, определяющего граничную вероятность правильного детектирования оптического импульса в данный момент времени, т.е. количество ошибок в потоке данных. Этот показатель, аналогичный показателю C/N для аналоговых систем, называется *вероятностью ошибки на бит (BER)*. Напомним, что BER равен числу ошибочных двоичных символов на выходе системы, деленное на общее

число принятых двоичных символов, при стремлении длины переданной двоичной последовательности к бесконечности:

$$BER = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{ER}}{N},$$

где N_{ER} – число принятых с ошибками бит; N – общее число принятых бит.

11.4. Оптический передатчик

Оптический передатчик является электрооптическим прибором для преобразования электрических сигналов в оптические сигналы. Он состоит из когерентного источника света и промежуточных соединительных компонентов между коаксиальным входом и оптическим выходом. С выхода оптического передатчика оптический сигнал подается в оптическое волокно.

Основными факторами при выборе оптических передатчиков являются:

1. *Быстродействие* (скорость переключения). Источник должен иметь малое время переключения (включения и выключения), чтобы соответствовать требованиям к скорости передачи информации в системе. Скорость переключения определяется временем нарастания (время, требуемое для увеличения выходной мощности источника от 10 до 90 %).

2. *Выходная мощность*. Источник должен иметь выходную мощность, достаточную для того, чтобы на выходе волокна было возможно уверенное детектирование оптического сигнала. Уровень выходного сигнала источника должен значительно превышать потери на проход через волокно и на волоконных соединениях и обеспечивать достаточное отношение сигнал/шум на входе детектора.

3. *Длина волны выходного сигнала*. Длина волны света, излучаемого источником, должна быть стабильна, а потери на этой длине волны должны быть минимальными в полосе пропускания волокна.

4. *Ширина спектра излучения*. В идеальном случае спектр излучения источника должен включать единственную длину волны, чтобы материальная дисперсия в волокне была минимизирована. Но спектр излучения реальных источников включает множество гармоник, поэтому его ширина определяется по уровню 50 % от максимального выходного значения амплитуды.

Важнейшей частью оптического передатчика является специальный источник когерентного направленного излучения, преобразующий входную электрическую энергию в выходную световую энергию. Такими преобразователями являются светоизлучающие диоды (LED) и лазерные (LASER) диоды. Те и другие источники изготавливаются из полупроводниковых материалов, обладающих излучающими свойствами, например, на основе арсенида галлия (GaAs). Первое поколение оптический передатчиков было внедрено в 1975 году. Основу передатчика составлял светоизлучающий диод, работающий на длине волны 850 нм в многомодовом режиме. К второму поколению относятся одномодовые передатчики, работающие на длине волны 1310 нм. Позднее светодиодные излучатели были заменены на более качественные суперлюминисцентные диоды и лазеры. Третье поколение передатчиков было создано на основе лазерных диодов с рабочей длиной волны 1550 нм. Последнее, четвертое поколение оптических передатчиков дало начало когерентным системам связи, в которых информация передается модуляцией частоты или фазы оптического излучения. Такие системы связи обеспечивают очень большую дальность распространения сигналов по

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

оптическому волокну без оптической регенерации – до 2,5 Гбит/с при протяженности линии более 500 км. Рассмотрим структуру обоих типов излучателей.

Светоизлучающий диод (Light Emitted Diode) представляет собой p-n переход, который самопроизвольно излучает свет при пропускании через него электрического тока. Вводя в переход путем легирования атомы различных добавок, таких как индий, алюминий, фосфор, можно менять длину волны излучения диода. Конус излучения LED-диодов значительно больше, чем апертура одномодового оптического волокна. Вследствие этого эффективность ввода излучения LED-диода в волокно с маленьким диаметром очень низка, если не применяются специальных методов локализации излучения. Хотя существует множество различных способов производства LED-структуры, в настоящее время преимущественно используется два: с воронкообразным эмиттером и с краевым эмиттером. Обе эти структуры показаны на рис. 11.1.

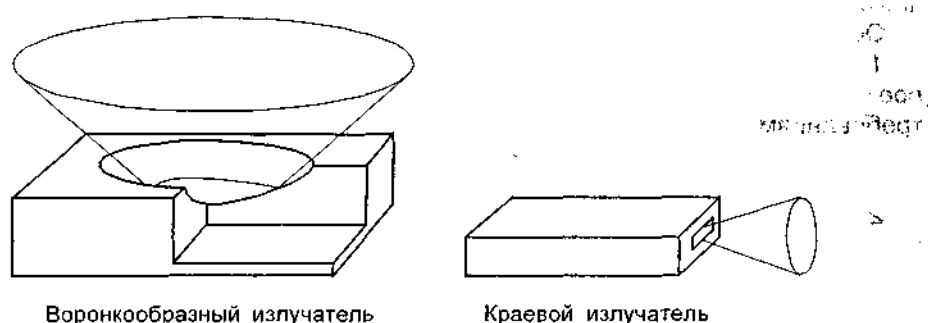


Рис. 11.1. Светоизлучающие диоды

Диод с воронкообразным эмиттером излучает свет с поверхностной области открытого углубления в виде воронки. Такая структура испускает широко расходящийся световой луч. Диод с краевым эмиттером излучает свет из узкой полоски, вложенной в полупроводник, и получаемый в этом случае световой луч существенно уже, чем в первом случае. LED-источники имеют следующие характеристики:

- широкий спектр выходного излучения;
- относительно слабая зависимость выходной мощности излучения от температуры, что позволяет упростить конструкцию прибора и обойтись без температурной компенсации;
- излучающий элемент имеет довольно большие размеры, поэтому потери при вводе света в волокно могут составлять более 10 дБ;
- продолжительное время эксплуатации;
- высокая емкость излучающего элемента может препятствовать цифровой модуляции на высоких скоростях;
- зависимость выходной мощности излучения от входного тока линейна в большей части диапазона, что особенно хорошо для систем с аналоговой модуляцией;
- выходная мощность ниже, чем у лазерных диодов;
- невысокая стоимость.

По вышеперечисленным характеристикам LED-источники наилучшим образом подходят для служб с низкими скоростями передачи и систем небольшой

протяженности, где недостатки этих приборов не слишком существенны. Использование многомодового волокна с большим диаметром сердцевины имеет много преимуществ в системах ограниченной длины, например, в пределах одного многоэтажного здания или группы близлежащих зданий. В таких случаях широкополосное излучение диода не будет серьезным ограничением.

Лазерные диоды являются также полупроводниковыми источниками. Понятие лазер происходит от аббревиатуры английского названия оптического квантового генератора (Light Amplification by Stimulating Emission and Radiation). Основным элементом структуры лазера является оптический резонатор, представляющий собой объемную полость из оптического материала. Лазерный диод (или просто лазер) может функционировать как обычный LED-диод, пока возбуждающий входной ток не достигнет порогового значения. В этой точке процесс рекомбинации излучаемых фотонов (который происходит в обычном LED) начинает стимулировать дополнительную эмиссию фотонов внутри оптического резонатора. Этот процесс называется оптической генерацией. Типичная структура лазера показана на рис. 11.2.

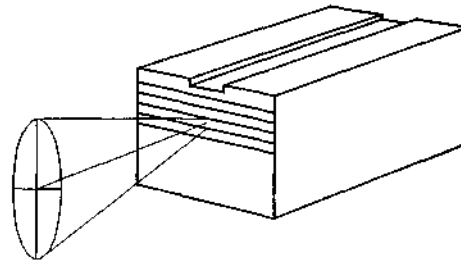


Рис. 11.2. Лазерный диод

С увеличением температуры прибора пороговое значение тока растет и выходная оптическая мощность изменяется. Длина волны выходного оптического излучения зависит от температуры и в связи с этим лазерам, в отличие от LED-диодов, требуется температурная компенсация, поэтому устройство лазеров значительно более сложно, чем устройство LED-диодов. Одним из используемых методов температурной компенсации является термоэлектрическое охлаждение с обратной связью (TEC). Когда электрический ток проходит через материал лазера, одна его сторона нагревается сильнее. Чувствительным элементом лазера является термистор, реагирующий на изменение температуры изменением сопротивления. С его помощью ток возбуждения лазера автоматически регулируется и стабилизируется. Схема передатчика на основе лазерного диода с термоэлектрическим контролем показана на рис. 11.3.

В дополнение к температурной стабилизации большинство лазеров включают контроль смещения, обеспечивающий стабилизацию самого порогового тока, который в противном случае мог бы также измениться под воздействием температуры. Схема передатчика с устройством контроля смещения порога показана на рис. 11.4.

Очевидно, функции стабилизации увеличивают сложность, а следовательно, и стоимость лазерных диодов по сравнению с обычными LED-диодами. Важным свойством лазерных излучателей является линейность выходной характеристики, что особенно важно при трансляции аналоговых сигналов.

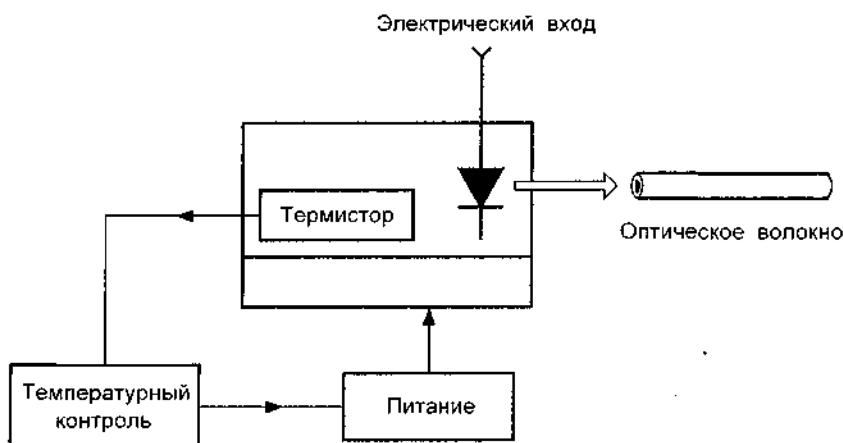


Рис. 11.3. Передатчик с термоэлектрическим контролем

Именно поэтому индекс модуляции, как в прямом, так и в обратном (если он есть) канале оптической системы, невелик (не превышает 10%).

Лазерные источники света имеют следующие характеристики.

- Выходная мощность зависит от температуры и требует сложной температурной компенсации, которая встраивается в прибор.
- Длина волны излучения зависит от температуры.
- Пороговый ток необходимо контролировать путем наблюдения за мощностью выходного излучения.
- Лазеры обычно производят некоторое оптическое излучение все время благодаря тому, что даже в режиме покоя они находятся в смещенном состоянии выше порогового тока генерации, чтобы в рабочем режиме избежать попадания в пороговую область.
- Обычно лазеры имеют более высокую мощность излучения, чем LED-диоды.
- Лазеры излучают более узкий световой луч, что упрощает ввод излучения в волокно с маленьким диаметром сердцевины.

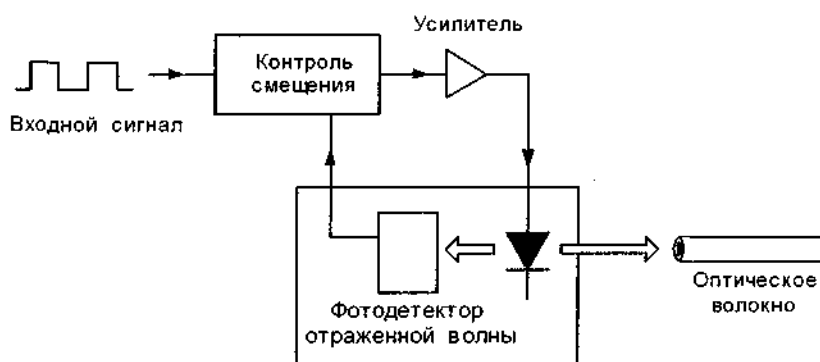


Рис. 11.4. Передатчик с контролем смещения

11.4. Оптический передатчик

• Лазеры имеют очень узкий, почти монохроматический, спектр излучения, т.е. все излучение сосредоточено на одной длине волны или рядом с ней. Этим объясняется то, что материальная дисперсия в волокне в этом случае минимальна.

• Лазерные диоды более дороги, чем светоизлучающие.

• Лазеры обычно имеют менее продолжительное время эксплуатации, чем LED-диоды.

• Лазеры имеют более короткое время нарастания, что позволяет использовать их для модуляции на высоких скоростях передачи.

Ввиду вышеперечисленных факторов лазеры более предпочтительны для передачи сигналов служб, требующих высоких скоростей, и систем большой протяженности, в которых используется одномодовое волокно.

Далее приводятся требования стандарта EN-50083 к набору показателей, публикуемых производителем в спецификации оптического передатчика:

- тип источника света (например, LED или DFB лазерный диод);
- средняя выходная мощность в дБм и ее допуск на оптическом интерфейсе в режиме основной моды;
 - центральная длина волны и ее допуск в нм;
 - диапазон длин волн в нм;
 - спектральная ширина при модуляции;
 - максимальная относительная интенсивность шума;
 - отношение C/N при указанном оптическом индексе модуляции;
 - минимальный оптический коэффициент возвратных потерь;
 - напряжения и ток питания;
 - тип волоконного соединителя или сплайса;
 - тип волокна;
 - среднее время наработки на отказ (MTBF);
 - модуляционные характеристики:
 - электрический входной уровень и допуск для указанного индекса модуляции;
 - диапазон модуляционных частот;
 - неравномерность модуляционной характеристики;
 - композитные искажения второго порядка с условиями измерения;
 - композитные тройные биения с условиями измерения;
 - композитная кроссмодуляция с условиями измерения;
 - влияние дисперсии на частотную характеристику, CSO, CTB и CXM.

Приемник может быть снабжен индикаторами тревоги и отказа при отклонениях выходного оптического уровня и номинальной температуры, а также индикатором "оп", индицирующим включение светового излучения. Электрический входной порт прибора должен иметь номинальный импеданс 75 Ом (в некоторых случаях, указанных в стандарте, допустим импеданс 50 Ом). Коэффициент возвратных потерь должен соответствовать одной из категорий, приведенных в EN 50083 (см. табл. 8.5, гл. 8).

11.5. Оптический приемник

Оптический приемник является электрооптическим прибором для преобразования оптических сигналов в электрические сигналы. Он состоит из оптиче-

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

ского детектора и промежуточных соединительных компонентов между оптическим входом и коаксиальным выходом. На вход оптического приемника подается оптический сигнал с выхода волоконно-оптической линии. Приемник обрабатывает полученный электрический сигнал, усиливая его и преобразуя импульсы тока в импульсы напряжения, чтобы сигнал с выхода приемника был совместим с той радиочастотной системой передачи, которая подключается к его выходу. Именно параметры оптического приемника во многом определяют технические возможности распределительной системы, среди которых длина регенерационного участка, рабочая полоса частот реверсного канала и качество выходного сигнала.

Основными факторами при выборе оптических приемников являются:

1. *Чувствительность фотодетектора.* Она измеряется соотношением его выходного напряжения к входной оптической мощности.

2. *Квантовая эффективность.* Это характеристика, которая аналогична чувствительности диода, выраженная как отношение числа фотонов, падающих на диод, к числу порожденных ими электронов, образующих ток во внешней цепи. Эффективность, равная 1 (или 100 %), означает, что каждый фотон увеличивает ток во внешней цепи на один электрон.

3. *Темновой ток.* Даже в отсутствии падающего света через диод протекает некоторый ток, объясняющийся тепловой генерацией электронно-дырочных пар. Этот ток, величина которого зависит от температуры прибора, называется темновым или током утечки.

4. *Эквивалентная или средняя мощность шума (NEP).* Это среднеквадратическая мощность сигнала, требуемая для получения единичного отношения сигнал/шум или минимальная оптическая мощность, необходимая для создания тока, равного собственному среднеквадратическому шумовому току прибора, который аналогичен тепловому порогу детектирования приемника.

5. *Время нарастания (время срабатывания).* Это время, которое требуется детектору для увеличения уровня его выходного электрического сигнала от 10 до 90 процентов пикового значения. Это время может составлять порядка 1 нс для лавинных диодов, около 3 – 4 нс для рpn-диодов и зависит от напряжения смещения.

6. *Напряжение смещения.* Работая с током, детектор требует смещения в рабочую область с помощью приложения к нему напряжения смещения. Обычно рpn-диоды требуют смещения менее 100 В, тогда как лавинные диоды требуют приложения нескольких тысяч вольт. Тем, что подача напряжения смещения повышает температуру фотодетектора, объясняется его влияние на время отклика, темновой ток и чувствительность прибора. С ростом смещения изменяются рабочие характеристики фотодиода.

Основным элементом приемника является фотодетектор, который преобразует поступающую энергию света в электрическую энергию выходного сигнала. В настоящее время используется главным образом два типа фотодетекторов: PIN-диоды и лавинные диоды APD. Рассмотрим в общих чертах устройство этих приборов.

PIN-диод является полупроводниковой структурой, которая включает область положительных зарядов (positive), область отрицательных зарядов (negative) и разделяющую их нейтральную область (intrinsic), обедненную носителями зарядов. Обедненная область создается обратным смещением перехо-

11.5. Оптический приемник

да, при котором через прибор течет очень слабый обратный ток. При обратном смещении электроны стремятся выйти из n-области во внешнюю цепь и образовать дырки в p-области, обедняя носителями заряда область перехода.

Когда свет падает на поверхность диода, поглощаемые фотоны создают электронно-дырочные пары в обедненной области. Затем электроны и дырки разделяются под действием обратного смещения перехода и текут в направлении своих областей. Каждая электронно-дырочная пара производит ток в один электрон во внешней цепи. Структура PIN-диода и диаграмма напряженности поля в ней показаны на рис. 11.5.

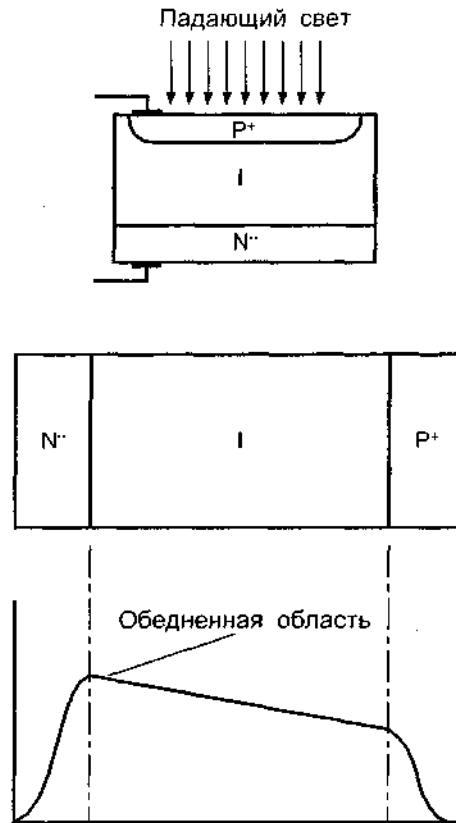


Рис. 11.5. PIN-диод

В идеальном PIN-диоде каждый фотон создает одну электронно-дырочную пару. Если на диод падает слабый световой поток, то производимый электрический ток может быть недостаточным, чтобы детектировать его на фоне внутреннего шума самого pin-диода и внешней цепи.

PIN-диод обладает следующими характеристиками:

- относительно простая структура по сравнению с лавинными диодами;
- относительно слабая чувствительность к изменению температуры прибора;
- квантовая эффективность обычно менее или равна 1;
- ограниченный динамический диапазон;

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

- высокая прочность и длительное время эксплуатации;
- небольшая стоимость;
- по сравнению с лавинными диодами низкая чувствительность при данном отношении сигнал/шум.

Лавинный фотодиод или APD (Avalanche Photo Diode) является альтернативой фотодетектору на основе PIN-диода. По сравнению с последними он имеет ряд преимуществ. Если на поверхность PIN-диода падает слабый световой поток, то выходной сигнал детектора также слаб, поэтому хотелось бы повысить его уровень перед дальнейшей его обработкой и усилением в электронной части фотоприемника. Это и обеспечивает структура, названная APD, которая показана на рис. 11.6.

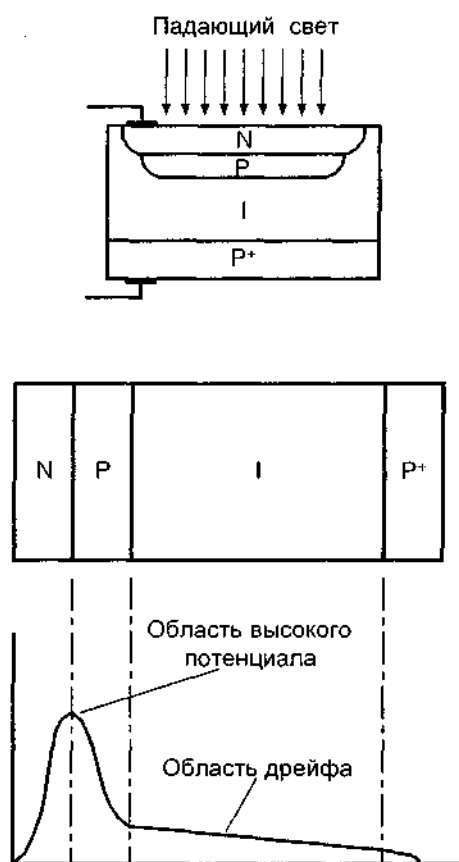


Рис. 11.6. Лавинный диод

Внутри части обедненной области лавинного диода создается сильное электрическое поле, напряженность которого отображена пиком на рисунке. Основные носители зарядов, порожденные падающими на диод фотонами (как и в pin-диодах), при попадании в это сильное поле способны усиливать выходную энергию на несколько электрон-вольт. Сталкиваясь с кристаллической решеткой, основной носитель отдает достаточно энергии для продвижения электрона

из валентной зоны в зону проводимости. Этот процесс называется ударной ионизацией. Вследствие этого неосновные носители могут создавать еще больше носителей заряда. В результате происходит явление, известное как лавинный пробой, которым и объясняется внутреннее усиление в диоде.

Количество электронов, образующих ток во внешней цепи диода, равно произведению числа падающих фотонов и коэффициента лавинного умножения прибора. Поэтому APD имеют квантовую эффективность около 4 (т.е. больше 100 %), хотя это может приводить также и к усилению шума на выходе прибора. Лавинные диоды чувствительны к изменению температуры, поэтому обычно в структуру фотодетектора на основе APD включена схема АРУ (автоматического контроля усиления), которая поддерживает стабильное напряжение смещения. Лавинные диоды обладают следующими характеристиками:

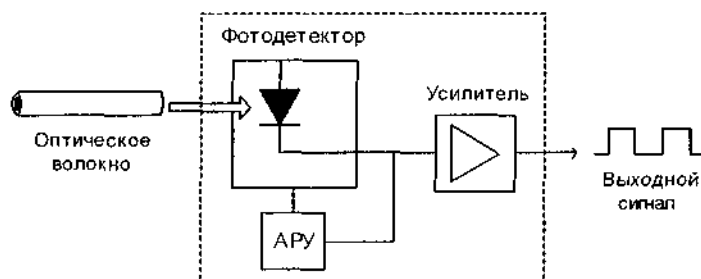


Рис. 11.7. Структурная схема оптического приемника

- более сложная структура по сравнению с PIN-диодами;
- чувствительность прибора зависит от его температуры;
- квантовая эффективность составляет от 3 до 4;
- более широкий динамический диапазон;
- высокая прочность и длительное время эксплуатации;
- более высокая стоимость по сравнению с PIN-диодами;
- чувствительность обычно на 5 – 6 дБ выше, чем у PIN-диодов.

Минимальные сведения об устройстве приемников необходимы как разработчику оптической системы передачи, так и обслуживающему техническому персоналу для того, чтобы контролировать работоспособность системы и правильность детектирования. На рис. 11.7 показана структурная схема оптического приемника. Обычно оптический приемник представляет собой чувствительный широкополосный фотодетектор с входным спектральным диапазоном, соответствующим рабочей длине волны (например, 1200 – 1600 нм для волны 1550 нм), который совмещен в одном корпусе с мощным двухступенчатым радиочастотным усилителем, имеющим высокую линейность. Для уверенного детектирования уровень оптического сигнала на входе приемника должен по крайней мере в два раза превышать уровень собственного шума приемника. Для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум или, в случае цифровой передачи, требуемого значения BER желателен более сильный входной оптический сигнал. Это требование аналогично приемлемому соотношению уровня входного сигнала и коэффициента шума прибора в обычной высокочастотной аналоговой системе передачи. Для снижения шума в некоторые схемы оптиче-

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

ских приемников включается трансимпедансный усилитель (усилитель напряжения, управляемый током на полевом транзисторе). Такие приемники, в которых используются детекторы на PIN-диодах, иногда называют устройствами PIN-FET (PIN-диод с полевым транзистором). Полевой транзистор в данном случае используется для усиления выходного сигнала детектора. Поскольку активные области поверхности детектора относительно велики, эффективное введение светового сигнала с выхода волокна в детектор не представляет трудной задачи. Иногда для минимизации потерь при вводе света в детектор применяются волокна с размером сердцевины, большим, чем у используемых в звене передачи, в виде коротких отрезков гибкого волокна. Обычно приемники на основе PIN-диодов устроены более просто, чем APD. Последние, особенно в сочетании с устройством термоэлектрического контроля (ТЕС), являются более сложными приборами.

В настоящее время выпускается множество моделей оптических приемников с различными конструктивными особенностями. Сказать о всех особенностях невозможно, но попробуем осветить главные. В основе обычно лежит модульная конструкция с широким выбором модулей разного назначения. В зависимости от технических требований, предъявляемых к сети, по выбору разработчика в разных моделях могут быть установлены следующие компоненты: модуль АРУ, оптический передатчик обратного канала, дуплексер прямого и обратного каналов, дополнительные сменные делители выходного сигнала. Наличие АРУ весьма важно в сетях с меняющейся нагрузкой или в условиях плохой стабильности параметров магистрали, в частности, при низком классе головной станции. Радиочастотный усилитель строится по тем же базовым принципам и схемам, которые были описаны в предыдущей главе. Выходная ступень должна иметь высокую линейность и создается по схеме Push-Pull или Power Doubler, между ступенями усилителя включается межкаскадный эквалайзер и аттенуатор с плавной или ступенчатой регулировкой. Несмотря на возможность передачи света по волокну в обоих направлениях, обратный канал зачастую организуется по отдельному волокну с помощью передатчиков обратного канала, встроенных в некоторые модели оптических приемников, и оптических приемников обратного канала, устанавливаемых на головной станции. Основой оптического передатчика реверсного канала тоже служит полупроводниковый лазерный диод с системой температурной стабилизации мощности выходного излучения. Регулировка коэффициента модуляции осуществляется изменением уровня сигнала, подаваемого на модулятор излучателя, для чего на входе оптического передатчика установлен аттенуатор. Рабочая полоса частот передатчиков реверсного канала приемников может меняться в зависимости от его загруженности. Рабочая полоса оптического приемника прямого канала по выходу должна соответствовать полосе последующей распределительной сети (50 – 862 МГц или 900 – 2150 МГц).

Ряд дополнительных функциональных особенностей, предоставляемых оптическими приемниками:

- возможность питания от местной электросети или по коаксиальному кабелю;
- возможность подключения с помощью различных оптических разъемов (FC, SC, E2000) и радиочастотных разъемов (RG-11, RG-11M);
- наличие тестовых точек контроля параметров прямого и обратного каналов;
- наличие сменных дуплексеров, позволяющих ступенчато менять верхнюю частоту обратного канала до 30, 55 или 65 МГц;

11.5. Оптический приемник

- наличие дополнительного оптического входа для резервирования оптической магистрали;
- наличие делителей мощности, позволяющих организовать два радиочастотных выхода;
- наличие встроенного генератора пилотной частоты для контроля оборудования системой сетевого менеджмента NMS (Network Management System) на головной станции.

Описанные характеристики и особенности приемников позволяют создавать разветвленные гибридные интерактивные сети кабельного телевидения большой канальной и абонентской емкости с достаточно протяженными магистралями без оптических репитеров. Один оптический приемник может обслуживать коаксиальный распределительный сегмент, включающий от 500 до 2000 абонентов при трансляции до 80 цифровых и аналоговых сигналов. Например, уровень входного оптического сигнала приемника ORC812 фирмы Hirschmann составляет $-4...+2$ дБ-м, а уровень выходного сигнала составляет 96 – 104 дБ-мкВ при отношении C/N более 53 дБ. Его входной динамический диапазон, таким образом, составляет не менее 6 дБ при чувствительности -4 дБ-м на длине волны 1550 нм. При использовании оптического передатчика OTS 800 с выходной мощностью 12,5 дБ-м на длине волны 1330 нм протяженность оптической магистрали составит более 40 км при одновременной трансляции 40 телевизионных каналов и уровне входного сигнала 2 дБм с учетом того, что потери в волокне составят 0,4 дБ/км. Показатели CTB и CSO этого приемника составляют соответственно более 68 и 63 дБ.

Далее приводятся требования стандарта EN-50083 к набору показателей, публикуемых производителем в спецификации оптического приемника и усилителя:

- рабочий диапазон длин волн в нм;
- диапазон входных оптических уровней;
- отношение C/N при указанном индексе оптической модуляции и входной мощности (для аналоговой передачи);
- входная мощность для указанного количества ошибок в потоке данных (для цифровой передачи);
- максимальная эквивалентная шумовая мощность NEP;
- максимальная плотность входного эквивалентного шумового тока;
- оптический коэффициент возвратных потерь по диапазону длин волн (рекомендуемое значение должно превышать 40 дБ);
- напряжение и ток питания;
- тип оптических коннекторов или сплайсов;
- тип волокна;
- средняя наработка на отказ (MTBF);
- демодуляционные характеристики:
 - чувствительность по напряжению и ее допуск в В/Вт,
 - диапазон автоматического контроля уровня,
 - номинальный рабочий выходной уровень,
 - диапазон выходных частот,
 - неравномерность амплитудно-частотной характеристики,
 - интермодуляция при заявленных выходных уровнях.

Приемник может быть снабжен индикаторами отклонения входного оптического уровня. Электрический выходной порт прибора должен иметь номинальный импеданс 75 Ом (в некоторых частных случаях, указанных в стандарте,

Глава 11. Активное оборудование оптических систем

допустим импеданс 50 Ом). Коэффициент возвратных потерь должен соответствовать одной из категорий, приведенных в EN 50083 (см. табл. 8.5, гл. 8).

Производители должны сообщать следующие показатели оптического усилителя:

- мощность насыщенная в зависимости от входной длины волны;
- выходная мощность насыщения в dBm в зависимости от входной длины волны;
- коэффициент шума в зависимости от входной мощности на указанной длине волны;
- показатели нелинейных искажений;
- оптический коэффициент возвратных потерь в диапазоне длин волн на входе (рекомендуемое значение должно превышать 40 дБ);
- минимальный оптический коэффициент возвратных потерь, вызванный дисперсностью отражения;
- напряжения и ток питания;
- тип волоконного соединителя или сплайса;
- тип волокна;
- среднее время наработки на отказ (MTBF).

Усилитель должен быть снабжен индикатором выходной мощности "оп", указывающим на излучение света.

Резюме

Построение крупных кабельных телевизионных сетей невозможно без использования оптического волокна в качестве транспортной или магистральной линии передачи от головного оборудования к распределительным абонентским сегментам, выполняемым, как правило, на основе коаксиального кабеля. В начале оптической линии, на головной станции, устанавливается оптический передатчик. Конечным прибором оптической линии является оптический приемник. При большой протяженности магистрали или транспортной линии возможно включение между передатчиком и приемником оптического усилителя, но в обычных сетях кабельного телевидения в этом нет необходимости. Во многом качество передачи в оптической линии определяется качеством волокна.

Оптические передатчики изготавливаются на основе светодиодов или более дорогих и качественных лазерных диодов. Оптические передатчики изготавливаются на основе PIN-диодов или APD-диодов. Обычно в состав оптического приемника включен радиочастотный усилитель, расположенный вместе с фотодиодным детектором в одном корпусе.

Искажения и шумы для цифровых и аналоговых оптических систем определяются разными показателями и измеряются в разных единицах. Преобразование времени нарастания в полосу частот возможно. В спецификации на аналоговое активное оборудование и оптическое волокно обычно даются в тех же терминах, что и спецификации на активное оборудование коаксиальных систем. Это позволяет находить комплексные показатели качества гибридной системы методом комбинирования с помощью диаграмм или аналитических выражений и упрощает, тем самым расчеты при проектировании системы, включающей волоконно-оптические сегменты и коаксиальную структуру. Как и в коаксиальных системах, в аналоговых оптических системах величины интермодуляционных искажений зависят от числа телевизионных сигналов и уровня выходного оптического сигнала передатчика. Величина шума зависит от устройства приемника и уровня оптического сигнала на входе приемника.

ГОЛОВНАЯ СТАНЦИЯ

Головные станции в системах кабельного телевидения предназначены для приема и обработки телевизионных сигналов с целью их последующего распределения. Выходы центральной головной станции являются входами транспортной сети (радиорелейной или, чаще, оптической), роль которой заключается в доставке сигналов от оборудования головной станции к кабельным распределительным сетям. В этой главе рассмотрим структуру и основные элементы оборудования головной станции, их функции, классификацию головных станций, способы получения исходных сигналов головной станцией, в частности, прием программ наземного вещания и спутниковый прием, а также технические параметры станции. Головная станция задает исходные параметры сигнала, поэтому именно она определяет возможное номинальное качество сигнала, приходящего в конечную абонентскую точку. Максимальное количество абонентов в системе коллективного приема ограничено шумовыми характеристиками оборудования головной станции и характеристиками распределительного оборудования.

12.1. Классификация головных станций

Под оборудованием головной станции понимается комплекс оборудования, предназначенного для формирования качественного группового телевизионного сигнала с целью его дальнейшего направления в распределительную кабельную сеть. Основным источником сигналов для центральной головной станции является эфирный прием – от спутниковых (СТВ) или наземных (НТВ) станций телевизионного вещания. В состав головного оборудования системы КТВ могут входить первичные внешние устройства, предназначенные для формирования исходного сигнала (антенные устройства, видеокамеры, видеоманитофоны), собственно головная станция (ГС) и выходные устройства (частотные дуплексеры, сумматоры и делители мощности, оптические передатчики), состав которых зависит от конкретной конфигурации создаваемой системы. В состав оборудования ГС могут входить мачтовые и спутниковые антенные устройства, антенные и предварительные усилители, полосовые фильтры, генераторы, диапазонные и канальные усилители, модуляторы и демодуляторы, частотные конверторы. Очевидно, головная станция составляет основу всей системы КТВ, определяет ее конфигурацию, масштаб области обслуживания и параметры сигнала. Головные станции (ГС), удельный вес которых в стоимости всей СКТВ составляет 10%, в большой степени определяют технический уровень всей сети. От того, какие параметры имеет головная станция, зависит максимальное число транслируемых каналов, протяженность магистралей, число абонентов и, самое главное, качество изображения на экранах телевизионных приемников.

Глава 12. Головная станция

В действующем ГОСТ Р52023-2003 поверхностно отражены требования, предъявляемые к параметрам головной станции. Это отражает тот факт, что отечественная промышленность практически прекратила выпуск современного оборудования для систем КТВ. В то же время в Европе и США множество фирм выпускает широкий спектр головного оборудования позволяющего построить систему КТВ любой конфигурации и масштаба. Среди наиболее известных производителей можно назвать фирмы WISI, IKUSI, Hirschmann. Европейский стандарт EN 50083 определяет характеристики головного оборудования. Поскольку существует множество моделей головных станций разного типа и емкости, рассмотрим общие требования к головным станциям.

Для правильного выбора головной станции, пригодной для проектируемой системы КТВ, необходимо принимать во внимание следующие характеристики:

- уровень распределения (транспортный, магистральный, домовый);
- максимальное количество абонентов;
- максимальное число транслируемых ТВ каналов (спутникового и наземного вещания);
- возможность приема цифровых и аналоговых ТВ каналов;
- возможность использования одного и того же оборудования для приема и распределения ТВ каналов спутникового и наземного вещания;
- стоимость системы на одного абонента.

В соответствии с иерархической трехуровневой архитектурой системы КТВ все головные станции можно разделить на три типа по их функциональному назначению:

- центральные,
- узловые (подголовные),
- местные (локальные).

Тип станции указывает на иерархический уровень системы, для которого она предназначена и, соответственно, определяет ее категорию качества и выходную емкость. Выходы головной станции любого типа являются входами сети следующего, более низкого, уровня кабельной системы передачи. Центральная головная станция предназначена для передачи сигнала в пределах всей области обслуживания системы КТВ. К функциям центральной ГС относится принятие программ из различных источников (спутниковых, эфирных, местных), кодирование каналов, создание базовых пакетов каналов, преобразование аналоговых сигналов в цифровые, контроль и менеджмент остального оборудования кабельной сети. С выхода центральной ГС сигнал подается к узловым ГС посредством транспортных линии (радиорелейных или кабельных). Узловая станция предназначена для обслуживания распределительного сегмента. С выхода узловой ГС сигнал подается в магистральную распределительную сеть данного сегмента, имеющую структуру транк-фидер или на основе одного кабеля. Для небольших систем (СКТ-1) предназначен вариант, называемый местной головной станцией, с выхода которой сигнал может сразу подаваться в домовую сеть. Качественные характеристики типов головных станций различаются. Очевидно, что наилучшими характеристиками обладают ГС первого типа, принимающие сигналы наземного и спутникового телевидения и формирующие качественные групповые сигналы для дальнейшей трансляции их в кабельной сети.

Классификация головных станций по ГОСТ Р52023-2003 уже была приведена в гл. 1. Согласно стандарту EN 50083, в пятой части которого отражены общие требования к головным станциям, классификация головных станций про-

изводится по типу системы коллективного приема, которую она должна обслуживать: MATV (Master Antenna Television System), SMATV (Satellite Master Antenna Television System) и CATV (Community Antenna Television System). Этой классификации более соответствуют станции зарубежного производства. Классификация, принятая в EN 50083, не рассматривается как требование, а лишь является рекомендуемой для производителей головного оборудования и операторов систем КТВ. Оператор КТВ имеет возможность выбора станции любого класса, исходя из соотношения цена-качество и принимая во внимание функциональность будущей системы.

Местные головные станции, относящиеся к классу MATV, используются для локального коллективного обслуживания абонентов, например в пределах распределительной домовой сети. Это классический способ коллективного использования антенны диапазона НТВ. Распределение сигнала осуществляется в диапазоне частот эфирного (кабельного) телевидения 5 – 862 МГц. Сигнал подается на абонентские розетки без конвертирования и демодуляции. Подобные системы создаются для небольшого количества абонентов в пределах одного многоквартирного здания. Если кроме антенны диапазона НТВ установлена спутниковая антенна, то возможно использование системы MATV без частотного уплотнения. В этом варианте коллективного приема диапазон частот кабельного ТВ (5 – 862 МГц) не совпадает с диапазоном выходных частот спутниковых антенн (950 – 2150 МГц), следовательно, сигналы от спутниковой и эфирной антенн можно раздавать по общему кабелю. При этом все устройства такой сети должны обеспечивать работу в диапазоне 5 – 2150 МГц, а каждый абонент должен иметь спутниковый ресивер.

Профессиональные головные станции класса SMATV предназначены для снабжения спутниковыми сигналами СТВ и сигналами НТВ групп многоквартирных домов и распределительных сетей. Согласно EN 50083-5, станции SMATV делятся на два подкласса: станция класса SMATV-A предназначена для трансмодуляции QPSK-сигналов спутникового ТВ в QAM-сигналы с последующим распределением, а станция класса SMATV-B предназначена для непосредственной трансляции сигналов в модуляции QPSK, причем возможны два варианта конфигурации SMATV-B. Первый, называемый SMATV-IF, является довольно дорогим для абонента способом приема, поскольку множество функций головной станции переносится на абонентское оборудование. Раздача сигнала с выхода головной станции осуществляется без конвертирования и демодуляции, в диапазоне спутниковой ПЧ (выше 950 МГц). Такие системы обладают большими возможностями, но требуют, чтобы у каждого абонента был установлен понижающий конвертор и спутниковый ресивер, а все пассивные элементы распределительной сети должны быть способны работать в диапазоне 5 – 2150 МГц. Как правило, подобные системы создаются для небольшого количества абонентов. Второй вариант конфигурации, называемый SMATV-S, предназначен для распределения сигнала QPSK в диапазонах МВ/ДМВ (например, в расширенном S-диапазоне 230 – 470 МГц). Станция класса SMATV-A использует трансмодуляторы QPSK-QAM для распределения цифровых спутниковых программ. В этих устройствах спутниковый цифровой QPSK-сигнал демодулируется, а затем полученным цифровым потоком модулируется несущая частота в диапазоне МВ или ДМВ. Цифровой каналный процессор (channel processor) переносит спутниковый цифровой сигнал, занимающий полосу частот 36 МГц, в полосу одного телевизионного канала 8 МГц. Заметим, что при трансмодуляции

Глава 12. Головная станция

транспортный цифровой поток MPEG-2/DVB не демультимплексируется и не декодируется, а просто преобразуется из спутникового стандарта DVB-S в кабельный DVB-C. Для приема цифровых программ у каждого абонента должен быть установлен ресивер-декодер MPEG-2/DVB с демодулятором QAM.

Профессиональные головные станции класса CATV (Community Antenna Television System) предназначены для обслуживания группы многоквартирных домов и распределительных сетей с конвертированием спутниковых каналов в диапазоны МВ и ДМВ, а также для преобразования частот каналов НТВ. При конвертировании спутниковых каналов на головной станции выполняется трансмодуляция ЧМ или QPSK сигналов в АМ сигналы. Для сигналов НТВ это не требуется, хотя относительно недавно появились цифровые каналы НТВ. Сигнал с частотной модуляцией в диапазоне 950 – 2050 МГц с выхода антенного оборудования подается на спутниковые ресиверы и демодулируется. Затем каналные процессоры формируют сигнал в кабельном диапазоне 47 – 862 МГц с амплитудной модуляцией, т.е. в том же виде, который воспринимается телевизионным приемником. Ретрансляция цифровых каналов QPSK осуществляется аналогичным образом. Канал принимается цифровым ресивером, декодируется и переносится модулятором в диапазон МВ или ДМВ. В такой системе спутниковые ресиверы используются абонентами коллективно, как и в системе SMATV. Но отличие состоит в том, что не требуется установка демодулятора QAM у абонента. Если оператор КТВ не кодирует свой сигнал, то у абонента не устанавливается никакой аппаратуры, кроме телевизора. Этот способ используется для раздачи телевизионных каналов в распределительных сетях, рассчитанных только на диапазоны МВ и ДМВ.

Центральная головная станция может относиться к классу CATV или SMATV. Узловая головная станция должна иметь класс CATV. Местная головная станция может иметь класс MATV или SMATV. В настоящее время широкое распространение получают головные станции комбинированного типа с электронной перестройкой входных и выходных параметров, сочетающие в себе свойства станций классов CATV и SMATV. Они предназначены для распределения аналоговых и цифровых сигналов СТВ и НТВ в распределительных сетях с количеством абонентов до 5000.

12.2. Прием спутниковых программ

Первоначально возможности эфирного приема систем КТВ были ограничены, поскольку им был доступен прием сигналов только от наземных радиовещательных источников (сигналы НТВ), для чего часто приходилось принимать специальные меры. Появлялось множество проблем, связанных с доступностью эфирного сигнала при наличии в обслуживаемой области естественных возвышенностей или высотных зданий. В местах, где естественный прием был невозможен, приходилось сооружать высокие мачтовые структуры и использовать массивные комплексы антенн. Высотные объекты могут являться причинами образования так называемых “колодцев” и переотражений сигнала. На рис. 12.1 показана такая ситуация, когда сигнал от эфирной вещательной станции приходит в точку приема двумя путями. В результате отражения от какого-либо объекта отраженный сигнал, также принимается антенной на головной станции, но проходит более длинный путь, чем сигнал, принимаемый по прямому пути, поэтому приходит на антенну позже, чем прямой сигнал. Отражен-

12.2. Прием спутниковых программ

ный сигнал может создавать видимую помеху, отображаясь на экране телевизора в виде вторичного контура, смещенного горизонтально от оригинального изображения на величину, зависящую от времени запаздывания. Насколько неприятным оказывается этот эффект для зрителя, зависит как от разности во времени между двумя изображениями, так и от амплитуды отражения.

Технология спутникового приема полностью изменила эту ситуацию, предоставив возможность приема огромного количества программ с высоким качеством и практически в любой точке, находящейся в зоне обслуживания данного спутника (сигналы СТВ). Спутники телевизионного вещания, которых существует сегодня более сотни, стали главным источником сигналов для головных станций систем КТВ.

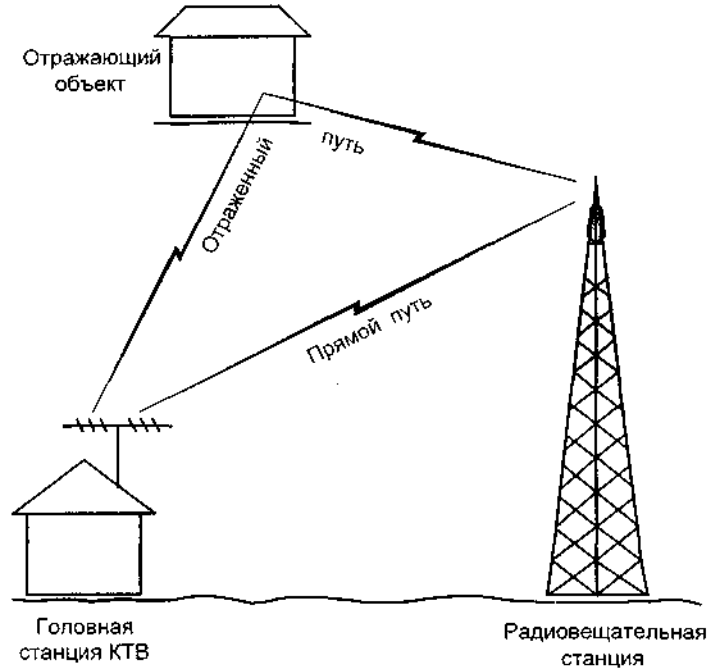


Рис. 12.1. Многократный эфирный прием

К наиболее популярным спутникам, сигналы которых уверенно принимаются в европейской части России, относятся спутники Thor, Astra, Intelsat 707, Eutelsat, Hot Bird, Экспресс, Галс. Способность приема спутниковых программ является одним из основных требований к современным системам КТВ, поэтому даже системы небольшого масштаба имеют такую способность. Интерес к просмотру программ спутникового телевидения в последнее время значительно возрос, поскольку эта технология уже почти стала общедоступной и переходит в разряд бытовой. Общедоступной она становится благодаря появлению в продаже индивидуальных приемных установок спутникового телевидения, которые уже составляют реальную конкуренцию системам коллективного приема спутниковых программ по распределительной кабельной сети с помощью комплекса антенного оборудования, устанавливаемого на головной станции. Спутники телевизионного вещания способны напрямую обслуживать частных абоне-

Глава 12. Головная станция

нентов, имеющих домашние станции спутникового приема. Если цена бытовых спутниковых приемников составляет не более 400 долл., то эта служба становится привлекательной для множества частных потребителей и может считаться рентабельной. Приемные антенны для домашних спутниковых приемников должны иметь небольшой размер, например, не более одного метра. Это требует использования защищенных методов модуляции и высокочувствительного приемного оборудования. В России наибольший интерес в этом смысле представляет проект НТВ-плюс. Абонентский комплект, включающий малогабаритную спутниковую тарелку и цифровой спутниковый ресивер, предоставляет возможность приема около 30 каналов.

Тем не менее, коллективный прием спутниковых программ по кабельной сети имеет ряд очевидных преимуществ по сравнению с индивидуальным приемом, как для абонента, так и для оператора кабельной сети. Во-первых, абонент будет избавлен от необходимости приобретать довольно дорогую индивидуальную установку, в состав которой входит спутниковый ресивер и приемная параболическая антенна. Стоимость подключения по сети обойдется ему гораздо дешевле (как показывает практика, в 4 – 5 раз). Во-вторых, абонент, подключаясь к кабельной сети, получает возможность пользоваться всеми услугами, предоставляемыми ею, в числе которых может быть и доступ в Интернет, и телефония, и, разумеется, просмотр программ эфирного телевидения. В-третьих, для оператора стоимость строительства системы в расчете на одного абонента понижается за счет увеличения числа абонентов.

Первые телевизионные спутники появились в начале 1960-х годов. Тогда они располагались на так называемых асинхронных орбитах для того, чтобы избежать транзитной задержки передачи, вызванной положением спутника на более высокой орбите. Позднее стали использовать синхронные орбиты. На рис. 12.2 изображен спутник, находящийся на высоте 35850 километров над землей. Орбита этого спутника является синхронной и геостационарной. Синхронной орбита называется потому, период обращения спутника вокруг земли равен периоду вращения земли вокруг своей оси (24 часам), т.е. вращение спутника синхронизировано с вращением земли. Геостационарной называется орбита, на которой спутник, находится всегда в одной и той же точке над поверхностью земли. При другой высоте орбиты спутник будет обращаться вокруг земли за время, отличное от 24 часов и, следовательно, будет несинхронным по отношению к земле. В результате с земли будет наблюдаться перемещение спутника и все приемные антенны на земле должны будут следить за этим перемещением. Спутник на асинхронной орбите будет на некоторое время уходить за горизонт и в течение этого времени ресивер не сможет принимать сигнал. Работа со спутниками, расположенными на геостационарной орбите, не имеет этих недостатков. В частности, упрощается технический процесс организации связи, становится возможной непрерывная круглосуточная связь, достигается высокая стабильность параметров принимаемого сигнала, а также отпадает необходимость в дорогих и сложных устройствах слежения за положением спутника – приемные антенны наземной станции фиксируются неподвижно. Это позволяет использовать антенны большего размера с большим усилением. Для поддержания спутника на синхронной геостационарной орбите требуется его постоянное позиционирование, т.е. отслеживание его положения и корректировка орбиты. Для этого используются двигатели, питаемые энергией солнечных батарей.

12.2. Прием спутниковых программ

Путь передачи сигнала через спутник показан на рис. 12.2. Сверхвысокочастотный сигнал диапазона СВТ распространяется в свободном пространстве со скоростью света, которая составляет $3 \cdot 10^8$ м/с. Любому сигналу, переданному с наземной станции, для прохождения расстояния до спутника, а затем обратно до принимающей наземной станции потребуется около 0,24 с. При передаче телевизионных сигналов эта задержка не имеет значения, однако, при передаче телефонии задержка ощущается в разговоре. Если, в передаче на большое расстояние задействованы два спутниковых звена, то задержка может стать в некоторых приложениях ощутимой. Спутники в этой схеме фактически являются радиорелейными станциями для наземных телевизионных систем.



Рис. 12.2. Геостационарная орбита

Спутниковое вещание осуществляется в соответствии со своим частотным планом (регламентом спутниковой радиосвязи), который был принят всемирной организацией МККР в 1977 г. Этим регламентом частотные диапазоны спутникового вещания назначены для трех условно выделенных географических районов земного шара. В первый район входят европейская часть Евразии и вся Африка, во второй район входит Азия и Австралия, а в третий – Северная и Южная Америка. Россия, таким образом, попадает в первый район спутникового вещания. Частотные диапазоны, выделенные для спутникового вещания, приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Диапазоны спутникового вещания (СВТ)

Диапазон	Полоса частот, ГГц
L	1,45 – 1,55 и 1,61 – 1,71
S	1,93 – 2,70
C	3,70 – 4,20 и 5,72 – 7,08
X	7,25-8,40
Ku	10,70 – 12,75 и 12,75 – 14,80
Ka	15,4 – 26,5 и 27,0 – 50,2
K	84,0 – 86,0

Глава 12. Головная станция

Наиболее часто используется нижняя часть С-диапазона (3,70 – 4,20 ГГц) и нижняя часть Ku-диапазона (10,7 – 12,75 ГГц). Ширина диапазона С составляет всего 500 МГц, а ширина полосы частот, занимаемой Ku-диапазоном, составляет более 2 ГГц. Более высокие по частоте диапазоны имеют большую емкость, но их освоение пока менее экономично. Некоторые диапазоны СТВ разбиты на несколько поддиапазонов. Например, Ku-диапазон имеет 3 поддиапазона: FSS (Fixed Satellite Service) на частотах 10,70 – 11,70 ГГц, DBS (Direct Broadcast Service) на частотах 11,70 – 12,45 ГГц и BSS (Broadcast Satellite Service) на частотах 12,45 – 12,75 ГГц. Каждый диапазон может использоваться в двух взаимно перпендикулярных направлениях поляризации, например, вертикальном и горизонтальном, что увеличивает их канальную емкость вдвое. В диапазонах СТВ выделены частоты, которые используются для прямой передачи сигналов со спутника на землю, и частоты, которые используются для обратной передачи с земли на спутник.

Уровень спутникового сигнала определяют в единицах ЭИИМ (эквивалентной изотропно-излучаемой мощности), которая характеризует плотность потока мощности сигнала в точке приема и измеряется в единицах дБ·Вт/м².

Перед поступлением непосредственно на приемное оборудование наземной головной станции сигналы спутниковых диапазонов преобразуются в сигналы диапазона, воспринимаемого спутниковым приемником. Используется два диапазона частот входного сигнала для спутниковых приемников: первый, стандартный, находится на частотах 950 – 1750 МГц, а второй, расширенный, занимает частоты 900 – 2150 МГц.

Основным элементом оборудования спутника телевизионного вещания является транспондер. Транспондер представляет собой комбинацию передающего и приемного оборудования, которое принимает сигнал на одной частоте и затем передает его уже на другой частоте. Рабочая мощность спутникового передатчика ограничена, поэтому передача сигнала должна осуществляться с помощью прогрессивных методов модуляции, обеспечивающих высокую помехозащищенность сигнала. В настоящее время для спутникового вещания используется аналоговая частотная модуляция (ЧМ) и цифровая модуляция. Переход на цифровую модуляцию QPSK и QAM существенно повысил помехозащищенность и уменьшил необходимую мощность передачи. Стандарт DBS (Digital Broadcast Satellite) регламентирует принципы организации системы цифрового спутникового вещания. При переходе на цифровые каналы используется кодирование (сжатие) сигнала по стандарту MPEG-2 в поток данных со скоростью передачи от 3 Мбит/с до 30 Мбит/с.

Спутники, используемые в настоящее время, могут передавать одновременно десятки каналов. Для обработки сигнала каждого канала на спутнике существует отдельный блок транспондера. Заметим, что в процесс обработки сигнала транспондером не входит его модуляция и демодуляция. Высокочастотная несущая, передаваемая с земли на спутник, уже модулирована по частоте информационными аудио и видео сигналами и глубина модуляции транспондером не изменяется. Полоса ЧМ сигнала одного аналогового телевизионного канала равна 27 МГц, а ширина защитной полосы между частотами соседними каналами составляет 4 МГц, таким образом, каждый аналоговый телевизионный канал требует полосы 31 МГц. Поскольку полоса диапазона С составляет 500 МГц, то в ней могут разместиться только 16 аналоговых телевизионных каналов. Но применение антенн с разделением по двум направлениям по-

ляризации позволяет повторно использовать частоты тех же 16 каналов, так что общее возможное число каналов становится равным 32. Диапазон Ku позволяет разместить в обеих поляризациях около 130 аналоговых каналов. При переходе на цифровое вещание сигнал в модуляции QAM, занимающий полосу частот 36 МГц, сжимается кодером MPEG-2 до полосы 8 МГц без потери качества передачи, что позволяет увеличить число транслируемых каналов еще в несколько раз. Разумеется, приемные антенны на земле также должны быть способны принимать аналоговые и цифровые сигналы в обеих поляризациях.

С помощью установленной на спутнике передающей антенны с высокой направленностью сигнал может быть направлен в требуемый географический район. Антенна концентрирует СВЧ энергию и уменьшает таким образом и ее рассеяние. Контур диаграммы направленности спутниковой передающей антенны на поверхности земли показывает распределение зоны обслуживания по мощности спутникового сигнала. Путь передачи от спутника до места установки приемной антенны должен быть свободен, т.е. спутник должен находиться в прямой видимости, чтобы сигнал на своем пути не претерпевал затухания на локальных препятствиях. Препятствиями могут быть не только непроницаемые объекты, но и такие объекты как плотные грозовые облака в атмосфере или сильный снег. Чем более сфокусированный и мощный сигнал будет передавать спутник в направлении наземной станции, тем меньшее усиление должно будет обеспечивать приемное оборудование наземной станции.

С целью защиты от бесплатного несанкционированного просмотра производитель спутниковых программ, как правило, кодирует свой видеосигнал. В настоящий момент существует и применяется несколько систем кодирования аналоговых и цифровых сигналов СТВ. Среди наиболее известных можно назвать системы: Viaccess, Power Vu, Irdeto, Mediaguard, Cryptowork. Смысл кодирования заключается в изменении исходного сигнала по определенному алгоритму, который делает его непригодным для просмотра после демодуляции. Для восстановления исходного видеосигнала приемник на головной станции КТВ должен сначала декодировать сигнал по тому же самому алгоритму, следовательно, частью оборудования головной станции должен быть декодер. Кроме того, в большинстве систем для авторизации доступа оператор должен приобрести smart-карту, разрешающую просмотр программ конкретного производителя в конкретной системе кодирования в течение определенного времени. Авторизованная (действительная) карта получает ключ, обеспечивающий декодирование. В настоящее время некоторое число каналов открыто для бесплатного просмотра, в основном это общественно-политические каналы или каналы новостей. Каналы развлекательного характера, спортивные и фильмовые обычно передаются в закрытом виде. По истечении оплаченного времени необходимо снова авторизовать карту, оплатив следующий срок.

12.3. Структура и оборудование головных станций

Современная головная станция системы КТВ является комплексом приемного и передающего оборудования, в который входят следующие элементы:

- приемные антенны диапазонов НТВ и СТВ;
- предварительные антенные усилители;
- антенные конвертеры;
- спутниковые ресиверы (приемники) диапазона 900 – 2150 МГц;

Глава 12. Головная станция

- каналные конвертеры и каналные модуляторы;
- делители и комбайнеры.

В профессиональных головных станциях приемник и каналный модулятор вместе с каналным конвертером, как правило, объединены в одно устройство, называемое каналным процессором. В станциях менее высокого класса могут использоваться спутниковые ресиверы как отдельные устройства. Кроме этого, головная станция может включать, генераторы, полосовые фильтры, оборудование кодирования, скремблирования и адресного контроля абонентских станций.

Приемное антенное оборудование

Антенное оборудование, устанавливаемое на головной станции, предназначено для приема сигналов спутникового (СТВ) и наземного (НТВ) вещания. Для каждого из этих двух типов сигналов на головной станции устанавливается свой антенный комплекс, отличающийся рабочим диапазоном длин волн и, разумеется, конструктивно. Элементами приемного антенного оборудования, является антенна, малошумящий предварительный усилитель и понижающий конвертор. Если ширина рабочего диапазона составляет несколько процентов от средней длины волны диапазона, то антенна называется узкодиапазонной, а если она составляет десятки процентов, то антенна называется широкодиапазонной. Антенны для приема сигналов СТВ работают в диапазонах, указанных в табл. 12.1, наиболее популярными являются диапазоны C (3,70 – 4,20 ГГц) и Ku (10,7 – 12,75 ГГц). Антенны для приема сигналов НТВ работают в метровых и дециметровых диапазонах.

Основными техническими характеристиками приемной антенны являются ширина диаграммы направленности или коэффициент направленного действия (КНД), ширина боковых лепестков (защитное отношение), эффективная площадь или диаметр, отношение фокусного расстояния к диаметру, эквивалентная шумовая температура, поляризация, коэффициент усиления.

При установке антенны диапазона НТВ в городских условиях рекомендуется обращать внимание на ее защитное отношение и КНД, поскольку именно эти параметры определяют уровень мешающих отраженных сигналов на входе головной станции. Для повышения качества приема в крупных сетях следует применять каналные антенны в метровом диапазоне и широкодиапазонные в декаметровом.

Антенна диапазона СТВ (спутниковая) выполняется в виде параболического зеркала, фокус которого либо расположен в центре (прямофокусная антенна), либо смещен (оффсетная антенна). С помощью параболического зеркала антенны сигнал со спутника фокусируется для повышения ЭИИМ. На выходе приемной антенны устанавливается предварительный малошумящий усилитель LNA (Low Noise Amplifier), который увеличивает уровни принимаемых сигналов, а также компенсирует потери в кабеле или волноводе антенного фидера и потери в делителе СВЧ мощности для подачи сигнала сразу нескольким приемникам. Без LNA уровень спутникового сигнала на выходе антенны может оказаться настолько низким, что с учетом потерь на входе приемника головной станции получится неудовлетворительное отношение C/N. Затем усиленный сигнал поступает на устройство, называемое малошумящим конвертером LNC (Low Noise Converter), который представляет собой гетеродинное устройство и служит для понижения несущей частоты принимаемого сигнала из диапазона СТВ в диапазон, воспринимаемый спутниковым приемником 900 – 2150 МГц.

12.3. Структура и оборудование головных станций

На рис. 12.3 схематически показано приемное антенное оборудование, включающее параболическую антенну, усилитель LNA и конвертор LNC.

Коэффициент направленного действия КНД антенны СТВ связан с ее эффективной площадью A следующим соотношением:

$$\text{КНД} = \frac{4\pi A}{\lambda^2},$$

где λ – средняя длина волны диапазона.

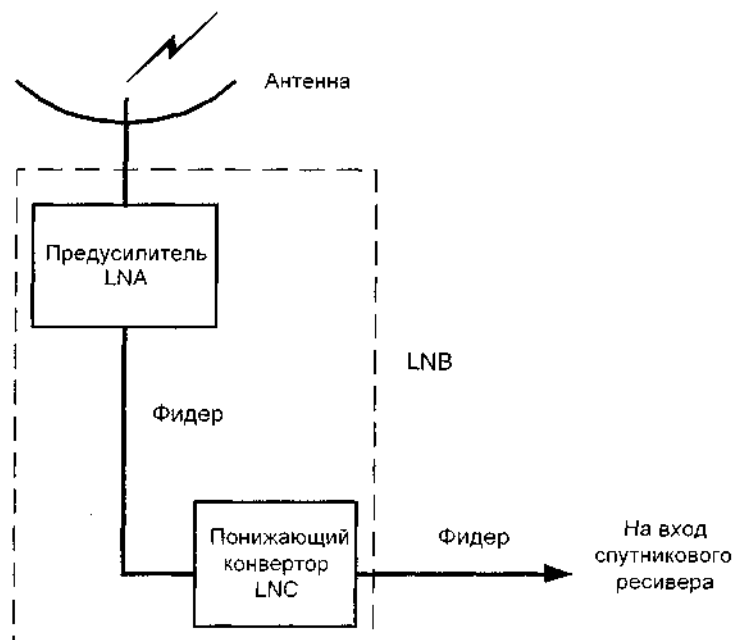


Рис. 12.3. Приемное антенное оборудование

Коэффициент усиления G антенны СТВ определяется через ее КНД и коэффициент полезного действия η :

$$G = \eta \cdot \text{КНД}.$$

Так как антенна является входным устройством, то особое внимание следует уделять ее шумовым показателям, а именно, шумовой температуре и шумовому напряжению. Наибольшее отношение S/N на входе спутникового приемника, достигается либо посредством антенного усилителя с минимальной шумовой температурой, либо с помощью приемной антенны с высоким усилением или комбинацией этих способов. Через известный коэффициент усиления LNA и известное значение шумовой температуры $T_{шА}$ антенны СТВ определяется шумовое напряжение $U_{шА}$ на выходе антенны. Затем по заданному отношению S/N_A на выходе антенны СТВ, которое определяется через требуемое S/N на входе спутникового приемника, рассчитывается требуемый уровень сигнала на выходе антенны:

$$S_{\text{вых}A} = 20 \lg U_{\text{ш}A} + C/N_A.$$

Кроме отношения C/N , для антенного оборудования существенны параметры нелинейных искажений. Интермодуляционные искажения отсутствуют только в одноканальном приемном оборудовании, но учитываются в LNA и понижающих конверторах, которые являются широкополосными приборами, обрабатывающими сигналы нескольких каналов. Увеличение усиления антенны достигается путем увеличения диаметра параболического зеркала антенны.

В спутниковом диапазоне принимаемые сигналы могут быть ослаблены во время сильных дождевых осадков, поэтому при разработке приемного оборудования обеспечивается достаточная чувствительность фидерной головки для допустимого граничного ЭИИМ. Как правило, это достигается использованием антенны большего размера и более высоким усилением головки. В условиях сильных снегопадов снег и лед накапливаются на поверхности тарелки и искажают параметры зеркала антенны, приводя иногда к серьезному снижению усиления антенны и ухудшению качества приема вплоть до пропадания изображения. Эти погодные факторы особенно существенны в тех географических областях, где зеркало антенны ориентировано почти горизонтально поверхности земли. При установке антенны СТВ необходимо знать величину ЭИИМ в точке приема. Исходя из этого значения (приводится в справочниках или измеряется) и требуемого отношения C/N на выходе спутникового приемника, можно определить нижнюю границу диаметра антенны D с помощью следующей оценочной формулы:

$$D \geq 10^{(C/N - \text{ЭИИМ})/20}.$$

Чем больше диаметр антенны площадь, тем больше ее эффективная площадь и коэффициент усиления, а, следовательно, тем выше будет уровень принимаемого сигнала. Например, если значение ЭИИМ в точке приема составляет $44 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$, а нормативное значение C/N для профессиональной системы коллективного приема составляет 54 дБ , то антенна должна будет иметь диаметр не менее 3 м . В зависимости от уровня ЭИИМ, излучаемой разными спутниками, для уверенного приема сигналов СТВ на головной станции системы КТВ антенная должна иметь размер зеркала от 2 до $3,5 \text{ м}$. Для качественного приема на индивидуальную установку СТВ достаточно отношения C/N , равного 42 дБ , поэтому диаметр антенны может не превышать $0,8 \text{ м}$.

При выборе точки установки приемной антенны уровень ЭИИМ в этой точке и географическое расположение наземной приемной станции определяет необходимое усиление приемной антенны и вертикальный угол ее подъема над горизонтом, с которым она должна быть установлена. Широко используемая для наземных приемных спутниковых антенн полярная подвеска позволяет просматривать всю видимую часть геостационарной орбиты при повороте антенны в одной плоскости. Угол подъема φ для полярной подвески зависит от географической широты места установки антенны и определяется по следующей формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{R \sin B}{h + 2R \sin^2(B/2)},$$

где h – высота геостационарной орбиты; B – географическая широта места установки; R – радиус земного шара.

12.3. Структура и оборудование головных станций

При выборе приемной антенны следует обратить внимание не только на ее технические показатели, но также на ее конструкционные характеристики и стоимость. Антенны, изготовленные из стали, обладают хорошей прочностью, стабильностью геометрических параметров зеркала и низкой стоимостью, но низкой стабильностью электрических параметров. В этом смысле лучшим вариантом являются алюминиевые антенны, имеющие более высокую стоимость. Антенны с зеркалом из стеклопластика имеют малый вес, хорошую прочность, стабильность электрических параметров, но могут менять геометрические параметры при изменении погодных условий. Самыми дорогими и качественными на сегодня являются антенны из термостойкого стеклопластика.

На рис. 12.3 изображена классическая схема антенного оборудования, в которой LNA и LNC выполнены как два отдельных блока. Такая схема использовалась ранее для приема сигналов СТВ и используется сейчас для приема сигналов НТВ. Как видно из рисунка, в ней блок LNC подключается к установленному на мачте антенному усилителю с помощью фидера, представлявшего собой отрезок коаксиального кабеля с некоторыми потерями. Предусилитель LNA обычно устанавливается непосредственно на антенной мачте, будучи соединен с ней, поэтому потери между антенной и LNA отсутствуют. В современном приемном антенном оборудовании предварительный усилитель и понижающий конвертор объединены в одном устройстве, называемом LNB (Low Noise Block). Устройство LNB называют также антенной фидерной головкой или малошумящим антенным конвертором, хотя в его состав входит не только конвертор. Потери в фидере между предусилителем и конвертором LNB отсутствуют, что повышает качество приема. Поскольку головка LNB является широкополосным устройством, одной головкой и одной антенной, нацеленной на спутник, достаточно для приема всех каналов с данного спутника.

Проанализируем влияние характеристик LNA и LNC на показатели качества системы коллективного приема. Допустим, что длина кабеля, соединяющего LNC с антенной, составляет 100 м и потери в этом кабеле равны 5 дБ. Примем значение коэффициента шума F конвертора равным 3 дБ. Сначала рассмотрим случай, когда предусилитель не установлен. Уровень спутникового сигнала с выхода антенны примем равным -15 дБ·мВ. При потерях в фидерном кабеле 5 дБ уровень на входе конвертора будет равен -20 дБ·мВ.

Вычислим отношение C/N каждого блока по формуле:

$$C/N = S_{\text{вх}} - S_{\text{ш0}} - F,$$

где $S_{\text{вх}}$ – уровень на входе устройства, $S_{\text{ш0}}$ – пороговый термический шум в полосе канала (2,4 дБ·мкВ или -58 дБ·мВ), F – коэффициент шума устройства.

Таким образом, отношение C/N антенного оборудования равно: $(-20) + 58 - 3 = 35$ дБ. Если теперь учесть шум, вносимый всей последующей распределительной кабельной сетью в целом (допустим, оно составляет 42 дБ), то результирующее отношение C/N в окончании системы, полученное комбинированием этих двух отношений, будет равно 34,3 дБ. Это совершенно неприемлемо с точки зрения нормативных показателей, поэтому предусилитель необходим.

Прделаем те же вычисления, предполагая, что на выходе приемной антенны установлен предусилитель. Допустим, что его F составляет 5 дБ, а его усиление равно 20 дБ. Проанализируем ситуацию при трех различных уровнях принимаемого спутникового сигнала: -15 дБ·мВ, -5 дБ·мВ и $+10$ дБ·мВ. Для этих трех случаев отношение C/N предусилителя будет равно соответственно:

$$C/N_1 = (-15) + 58 - 5 = 38 \text{ дБ},$$

$$C/N_2 = (-5) + 58 - 5 = 48 \text{ дБ},$$

$$C/N_3 = 10 + 58 - 5 = 63 \text{ дБ}.$$

При входном уровне -15 дБ·мВ и усилении 20 дБ уровень на выходе предусилителя составляет $+5$ дБ·мВ. Потери в антенном кабеле были взяты равными 5 дБ, следовательно, на входе конвертора получим уровень 0 дБ·мВ. Тогда отношение C/N конвертора будет равно: $C/N = 0 + 58 - 3 = 55$ дБ. Комбинируя C/N гетеродина (55 дБ) с C/N предусилителя (38 дБ) при уровне сигнала 0 дБ·мВ, получаем, что C/N на входе головной станции равно $37,8$ дБ. Комбинирование этого отношения с C/N кабельной структуры (42 дБ) дает общее C/N системы около 37 дБ. Хотя это отношение нельзя считать удовлетворительным, оно существенно лучше, чем полученное ранее отношение $31,6$ дБ в отсутствие предусилителя.

Проделаем все эти расчеты с более высоким уровнем сигнала на выходе антенны -5 дБ·мВ. С учетом потерь в антенном кабеле 5 дБ уровень на входе гетеродина будет равен -10 дБ·мВ. Тогда C/N конвертора будет равно:

$$C/N = (-10) + 58 - 3 = 45 \text{ дБ}.$$

Комбинируя это отношение с C/N кабельной структуры (42 дБ), получим общее C/N системы около 39 дБ. Это также неприемлемо, но если использовать LNA с усилением 20 дБ, то уровень на его выходе составит $+15$ дБ·мВ, а после антенного кабеля с потерями 5 дБ на входе конвертора уровень составит $+10$ дБ·мВ. Рассчитанное для этого случая C/N равно 48 дБ, следовательно, C/N конвертора будет равно 62 дБ. Комбинируя C/N предусилителя (48 дБ) с C/N конвертора (62 дБ) и C/N кабельной сети (42 дБ), получим C/N всей системы, равное 41 дБ.

Из этих расчетов можно сделать несколько выводов. Использование малошумящих антенных усилителей, повышающих отношение сигнал/шум на входе головной станции, необходимо при приеме сигналов СТВ и практически всегда целесообразно при приеме сигналов НТВ. Если антенный комплекс расположен в местности с низким уровнем электромагнитных помех, то усиление в полосе приема играет решающую роль. Важно усиление во всей полосе, так как с повышением частоты влияние коэффициента шума антенного усилителя возрастает и снижается минимальный требуемый уровень сигнала на выходе антенны.

Антенные конверторы (LNB)

От качественных характеристик конверторов в первую очередь зависит качество сигналов, поступающих от головной станции в распределительную сеть. За последние годы конверторы стали качественнее, компактнее и надежнее. К основным техническим характеристикам конверторов LNB относятся диапазон частот, коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура, коэффициент усиления, стабильность частоты гетеродина. Также имеют значение вес, размеры, надежность. Современные конверторы могут иметь очень низкий коэффициент шума (до $0,5$ дБ), шумовую температуру около 15 К и массу около 400 г. Надежность конвертора в большой степени зависит от степени его защищенности от климатических условий, поскольку он подвергается непрерывному воздействию атмосферной влажности и перепадов температуры. Требования к конвертору очень высоки, поскольку он должен быть

пригоден для работы с аналоговыми и цифровыми спутниковыми приемниками различных диапазонов. Среди наиболее известных конверторы фирм Cardiner, Grundig, Oxford.

Частота гетеродина антенного конвертора рассчитывается для конкретного частотного поддиапазона СТВ и для определенной поляризации (горизонтальной или вертикальной линейной, правой или левой круговой). Для работы в С-диапазоне достаточно одного преобразования частоты вниз, поскольку всю его полосу (3,70 – 4,20 ГГц) можно перенести полностью в диапазон входных частот спутникового ресивера (950 – 2150 МГц) с помощью одного гетеродина с частотой 5150 МГц. Перенести сигналы всей полосы Ku-диапазона в диапазон входных частот спутникового ресивера одним гетеродином невозможно, поскольку ширина его полосы составляет более 2 ГГц (10,7 – 12,75 ГГц), что превышает диапазон входных частот спутникового ресивера. Для приема спутниковых сигналов в разных поддиапазонах и с разными поляризациями используется два принципиально различных подхода – для индивидуального и для коллективного приема.

Для индивидуального приема можно применять перестраиваемые универсальные (Universal LNB), которые имеют возможность приема в обоих направлениях поляризации и во всех поддиапазонах. Переключение поляризации в них осуществляется изменением питающего напряжения LNB с 13 В (вертикальная) на 18 В (горизонтальная). Переключение поддиапазонов выполняется аналогичным способом с помощью управляющего сигнала, формируемого ресивером. Например, при одной форме импульсов управляющего сигнала работает первый гетеродин с частотой 9750 МГц, осуществляя прием в поддиапазоне FSS (10,70 – 11,70 ГГц), а при другой форме работает второй гетеродин с частотой 10600 МГц, осуществляя прием в поддиапазоне DBS (11,70 – 12,45 ГГц). Управляющий переключением поддиапазонов и поляризаций универсального конвертора сигнал подается вместе с напряжением питания по одному фидерному кабелю от спутникового ресивера. Такой подход неприемлем в профессиональных системах коллективного приема, поскольку если конвертор подключен к нескольким ресиверам, которые настроены на разные поддиапазоны и поляризации, то при его перестройке работа части ресиверов нарушится. В системах коллективного приема должна обеспечиваться возможность одновременного и независимого приема сигналов во всех направлениях поляризациями и во всех доступных поддиапазонах, разумеется, если в этом есть необходимость и на спутнике присутствуют эти сигналы.

Для коллективного приема применяется набор неперестраиваемых конверторов, каждый из которых настроен на свой фиксированный поддиапазон и свою поляризацию. В разных моделях используется отдельное устройство LNB для каждой поляризации или, что встречается более часто, используется одно LNB устройство с двумя выходами (V и H). Одновременность приема в обеих поляризациях обеспечивается с помощью ортоплектора или специального конвертора с уплотнением поляризаций.

Ортоплектор является волноводным устройством, которое позволяет подать сигналы разных поляризаций на разные выходы. Конвертор с уплотнением поляризаций обрабатывает сигналы с одной поляризацией гетеродином 11250 МГц и конвертирует их в диапазон 950 – 1450 МГц, а сигналы с другой поляризацией переносит гетеродином 10675 МГц в диапазон 1525 – 2025 МГц. Такой конвертор имеет единственный выход, на котором присутствуют сигналы обеих поляриза-

Глава 12. Головная станция

ций в диапазоне 950 – 2025 МГц. Полнодиапазонные конверторы с несколькими выходами устроены так, что они принимают сигналы во всех поддиапазонах и поляризациях, но внутри эти сигналы разделяются и на каждый выход подается сигнал одного поддиапазона и одной поляризации. Как правило, это просто несколько обычных конверторов, объединенных в одном корпусе. Частоты гетеродина Ku-диапазона лежат в диапазоне от 9750 МГц до 11475 МГц.

Сигнал с каждого выхода конвертора LNB может подаваться с помощью делителя мощности на несколько спутниковых ресиверов. В любой момент сигнал с нужного выхода конвертора может быть подан на вход любого ресивера путем ручной коммутации кабелей или с помощью переключающего устройства, называемого мультисвитчем. Мультисвитч представляет собой матричный коммутатор с 2, 4 или 8 спутниковыми входами, на которые могут подаваться сигналы от разных выходов разных конверторов. К выходам мультисвитча подключаются спутниковые ресиверы.

Спутниковый приемник (ресивер)

Спутниковый приемник или ресивер в профессиональной головной станции является частью канального процессора. Однако, ресиверы могут использоваться и как отдельные устройства, в частности, бытовые. Популярные бытовые спутниковые ресиверы выпускаются фирмами Nokia и Scientific Atlanta. Ресивер имеет встроенные декодеры и предназначены для работы в системах SMATV и малых кабельных сетях.

Ресиверы, как правило, поддерживают все аналоговые видеостандарты (PAL, SECAM и NTSC) и цифровой стандарт DVB/MPEG-2. Цифровые сигналы поступают на декодеры видео и звука, с выхода декодера звукового на цифроаналоговый преобразователь, а затем на выход приемника. Профессиональный приемник уметь работать с разными кодировками, для чего ему необходимо несколько декодирующих модулей условного доступа. В конструкции приемника есть четыре функциональных блока: спутниковый тюнер, демодулятор, декодеры потока MPEG-2 для видео и аудио сигналов и считывающее устройство для смарт-карт.

Настройка приемника осуществляется с помощью внутреннего микропроцессора. Настраивается четыре параметра: поддиапазон (путем выбора частоты гетеродина или промежуточной частоты), скорость передачи данных SR (Symbol Rate) в бодах, поляризация и отношение коррекции ошибок в цифровом потоке данных (FEC). Иногда требуется еще установить тип LNB (Universal или фиксированный). По этим параметрам формируется управляющий сигнал, подаваемый на схему сканирования частотного диапазона приемника. Остальные параметры, как правило, устанавливаются автоматически. Количество ошибок подсчитывается процессором приемника и может служить объективным показателем качества входного сигнала. Возможность ручной установки PID (идентификатора канала) позволяет принимать сигналы, качество которых далеко от идеального. Настройка выполняется на экранном меню либо на собственном дисплее, расположенном на передней панели приемника.

Канальные процессоры

Главным элементом головной станции является блок канальной обработки сигнала, который также называется канальным процессором или канальной кассетой. Канальный процессор служит для демодуляции спутниковых сигна-

лов СТВ для их преобразования в форму, воспринимаемую терминальным оборудованием абонента кабельной сети, и для конвертирования эфирных сигналов НТВ на отведенную ему частоту в кабельной сети. Сигналы подаются на каналные процессоры с выходов делителей спутникового и эфирного сигнала. Количество каналных процессоров, очевидно, должно быть равно количеству транслируемых с головной станции каналов.

В общем случае каналный процессор состоит из приемника (демодулятора) и модулятора с каналным конвертором, усилителями и полосовыми фильтрами. Каждый каналный процессор вырезает из выходного сигнала спутникового конвертора (950 – 2150 МГц) сигнал только своего канала и переносит его на другую несущую частоту, соответствующую принятому в данной кабельной сети частотному плану. Сигналы, передаваемые со спутника, модулированы иным способом модуляции, нежели в кабельной сети, поэтому на приемной стороне процессор сначала демодулирует сигнал, например, из широко используемого QPSK, а затем вновь модулирует его, например в АМ для подачи его в распределительную кабельную сеть. Каждый спутниковый приемник имеет демодулятор, который восстанавливает исходный низкочастотный аудио-видео сигнал, и модулятор, который выдает модулированный теми же аудио/видео сигнал. В системе CATV на выходе спутникового ресивера имеем обычный АМ телевизионный сигнал. Технические характеристики каналных процессоров большинства производителей позволяют распределять этим методом аналоговые и цифровые каналы. Цифровые каналные процессоры стандарта DVB/MPEG-2 пока имеют довольно высокую стоимость, поэтому вместо них можно использовать комбинацию бытового или полупрофессионального цифрового ресивера с модулятором.

Для создания конвертеров каналных процессоров в разное время применялись различные схемотехнические решения. Рассмотрим каналные процессоры без преобразования частоты, с однократным и двукратным преобразованием частоты. Один из наиболее простых методов приема и обработки радиовещательных ТВ сигналов в каналном процессоре (без преобразования частоты) показан на рис. 12.4.

Схема включает серию идентичных усилителей, каждый из которых работает в VHF полосе. Этот метод применим только для приема каналов диапазона НТВ. Чтобы избежать проблем с интермодуляцией, усилители делались одноканальными, а сигналы одного канала выделялись с помощью полосовых фильтров на входе и на выходе каждого усилителя. Недостатком этого способа является то, что он обеспечивает неполное подавление нежелательных сигналов соседних каналов, которые могут проходить как через фильтры, так и через усилители, интерферируя с полезным сигналом и создавая интермодуляционные искажения. Кроме того, он обладает лишь минимальной возможностью отдельного контроля видео и аудио несущих, ограниченным действием АРУ, а конвертирование канала на другую частоту в таком устройстве вовсе невозможно, поэтому в настоящее время такая схема не применяется.

Отказавшись от первого подхода, разработчики обратились к схеме с однократным преобразованием частоты, в которой применялся метод встречно-каскадного включения каналных демодуляторов и модуляторов с разделением сигналов видео и аудио, как показано на рис. 12.5. Полосопропускающие фильтры соответствующей добротности на входе демодуляторов и их собственная селективность позволяла получать чистый видеосигнал без помех, однако, повторная модуляция в этом методе имела свои сложности.

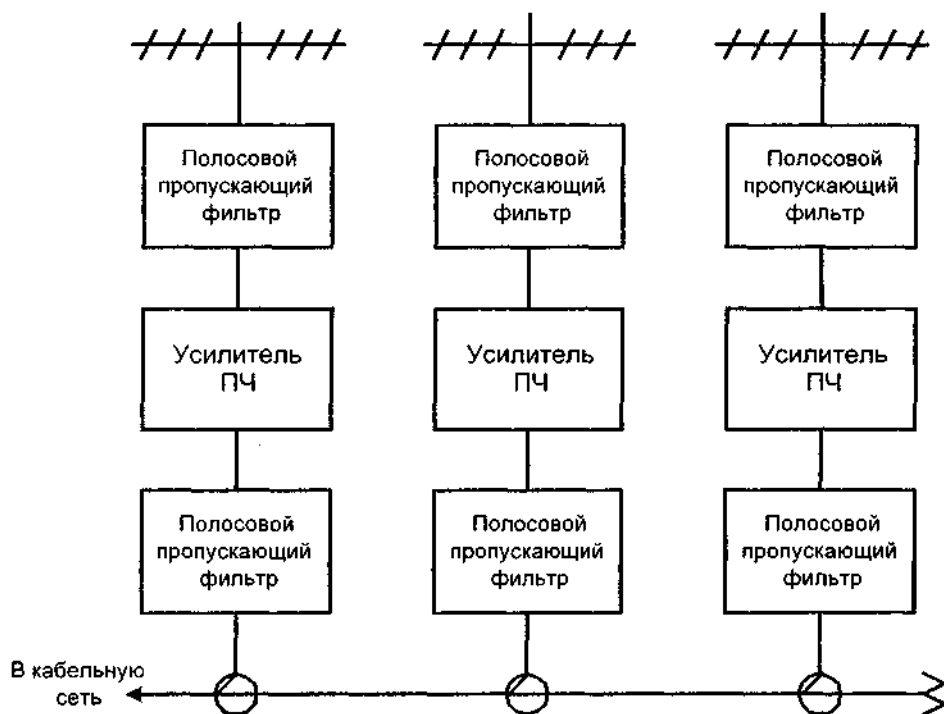


Рис. 12.4. Обработка без преобразования частоты

Метод позволял легко производить конвертацию частоты каналов, но качество выходных сигналов зависело от установленной глубины модуляции как по видео, так и по аудио.

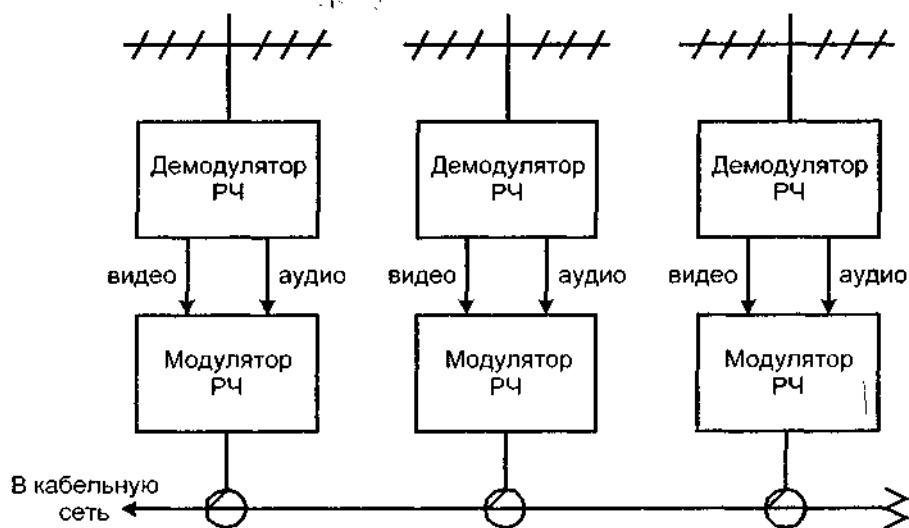


Рис. 12.5. Обработка с однократным преобразованием частоты

12.3. Структура и оборудование головных станций

Кроме того, возникал вопрос о стабильности частоты ВЧ несущей, поскольку источником подаваемого в кабельную сеть сигнала теперь становился демодулятор/модулятор.

Следующим шагом в построении канальных процессоров был метод супергетеродинной обработки сигналов, основанный на двукратном преобразовании частоты. Практически во всех современных моделях используется схема с двойным преобразованием частоты, состоящая из двух конверторных блоков (понижающего конвертора и повышающего конвертора) и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). Схема оборудования показана на рис. 12.6. Устройство гетеродинной обработки каждого канала, состоит из понижающего конвертора (down-converter), усилителя промежуточной частоты и конвертора в частоту канала (up-converter).

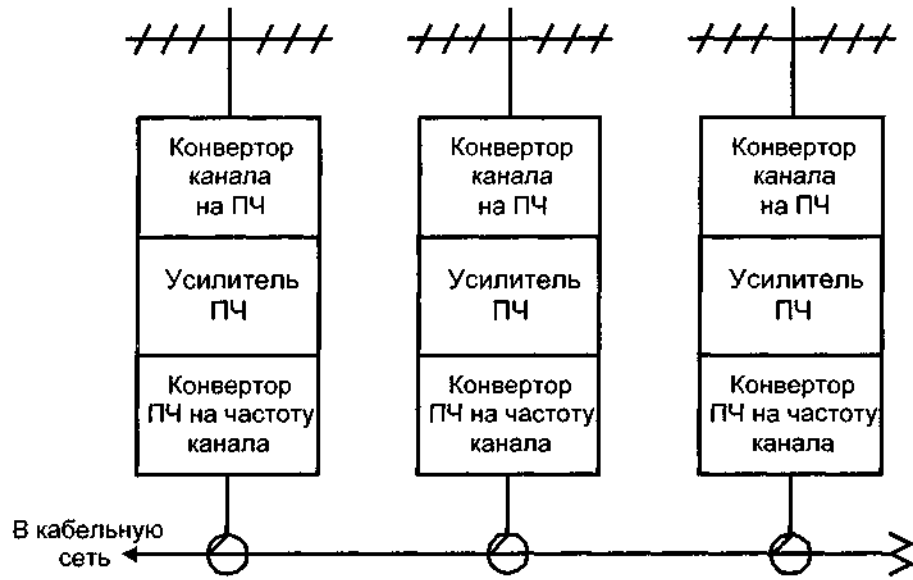


Рис. 12.6. Обработка с двукратным преобразованием частоты

Каждый конверторный блок включает в себя полосовые фильтры, настроенные на частоты канала приема, усилитель, смеситель и гетеродин. Усилитель УПЧ, включающий фильтр ПАВ на поверхностных акустических волнах (SAW), определяет избирательность конвертора по соседнему каналу. Сначала с помощью понижающего конвертора с гетеродином f_{r1} выполняется преобразование частоты входного сигнала на промежуточную частоту $f_{пч}$, потом сигнал усиливается на промежуточной частоте, а затем с помощью повышающего конвертора с гетеродином f_{r2} делается преобразование отфильтрованного сигнала промежуточной частоты вверх в диапазон входных частот $f_{вых}$. Как правило, в преобразователях берут частоту гетеродина выше частоты входного сигнала, а в качестве сигнала со смесителя используют разностно-частотный сигнал:

$$f_{пч} = f_{r1} - f_{вх},$$

$$f_{вых} = f_{r2} - f_{пч} = f_{вх} + (f_{r2} - f_{r1}).$$

Глава 12. Головная станция

Таким образом, первый (понижающий) конвертор выдает входной сигнал на стандартной для всех каналов промежуточной частоте, который затем подается на сложный усилитель промежуточной частоты с высокой селективностью и устройством АРУ. Поскольку устройства гетеродинной обработки всех каналов используют одинаковые усилители ПЧ, то сложность конструкции этих усилителей не является недостатком. С выхода усилителя ПЧ сигнал подается на повышающий конвертор со своим локальным генератором, который может перенести данный канал с промежуточной частоты на любую удобную или выбранную частоту канала диапазона ОВЧ, используемую в системе КТВ.

При равенстве частот гетеродинов конвертор с двукратным преобразованием не смещает частоту входного сигнала и работает как канальный усилитель. Использование конвертора с двойным преобразованием в режиме канального усилителя, т.е. без конвертации частоты принимаемого сигнала, возможно при приеме сигналов диапазона НТВ. В этом случае конвертор настраивается его по входу и выходу на одну и ту же частоту. Фильтрация происходит на промежуточной частоте (38,0 МГц или 38,9 МГц) с помощью ПАВ.

Поскольку все усилители ПЧ работают с одной и той же частотой, данный метод имеет множество преимуществ. Например, одна телевизионная программа может подаваться одновременно на все канальные блоки на ПЧ и в случае аварийной ситуации в системе единственный модулятор с выходом по ПЧ может обеспечить аварийную замену программы, переключая ее на нужный канал. Также получаем надежную возможность регулировки уровня как аудио так и видео несущей, а, кроме того, поскольку в схеме нет демодуляторов, то отношение между несущими изображения и звука остается неизменным, каким оно было изначально установлено на передающей станции. Еще одним достоинством этого метода является гибкость оборудования. Если, например, следует добавить к принимаемым эфирным каналам UHF каналы, необходимо только установить другой входной понижающий конвертор, чтобы получить на его выходе ту же ПЧ. Метод обеспечивает и многие дополнительные свойства, такие как генерация резервной несущей холостого хода (stand-by), которую кабельная структура получает даже если эфирный сигнал был прерван. Это позволяет использовать эти несущие как пилотные сигналы в целях АРУ или АРН усилителей системы. Конвертировать эфирные каналы в каналы кабельной сети можно практически без ограничений с перестановкой каналов или без нее. Так эфирный 3 канал можно продолжать называть 3 каналом в кабельной сети или переименовать его в 6 канал или 11 канал или какой-либо другой по желанию. Важным свойством устройства гетеродинной обработки является его способность конвертирования частот обратного канала на промежуточную частоту. Сигналы, передаваемые на головную станцию в диапазоне 5 – 30 МГц, могут быть просто перенесены на соответствующие частоты в дополнение к сигналам ОВЧ прямого направления передачи кабельной сети.

Недавно появились новые канальные конверторы диапазона НТВ с четырехкратным преобразованием частоты. Такой конвертор разработан фирмой WISI. В его структуре также присутствует понижающий и повышающий конвертор, но каждый из них, в свою очередь, выполнен по схеме с двойным преобразованием частоты, т.е. включает два конверторных блока (понижающий и повышающий). Весь диапазон в нем разбит на несколько участков с помощью перестраиваемых фильтров, что позволило снизить величину интермодуляции во входных цепях и расширить динамический диапазон. При перестройке кон-

12.3. Структура и оборудование головных станций

вертора по частоте, встроенный микроконтроллер подключает к входу соответствующий фильтр. Предварительный малошумящий усилитель для диапазона НТВ можно отключить, если уровень сигнала с антенны достаточно высок. Диапазон выходных частот конвертора составляет 47 – 862 МГц, выходное отношение С/Н составляет 56 дБ.

В современных канальных процессорах используются гетеродины, построенные на базе цифровых синтезаторов частоты, причем в качестве опорной частоты для синтезаторов первого и второго гетеродинов может быть использована либо единая опорная частота, вырабатываемая общим кварцевым генератором и подаваемая на синтезаторы, либо для каждого синтезатора может использоваться свой собственный опорный кварцевый генератор. Конвертор фирмы Blankom GKU-301 построен по схеме с единым опорным генератором и имеет возможность включения режима фазовой синхронизации гетеродинов, что позволяет использовать его в режиме канального усилителя без опасности возникновения помех. В конверторе OV43 фирмы WISI предусмотрена установка режима работы канального усилителя, но синхронизация гетеродинов в этом режиме отсутствует, что приводит к возможности появления помех. То же можно сказать и о более современной модели конвертора OV45A фирмы WISI и модели SKU-303x фирмы Hirschmann. Российские разработчики в начале 90-х создали модулятор кабельного телевидения МТ 300, который имел в своем составе конвертор с двойным преобразованием. В настоящее время из-за низкого уровня развития элементной базы и отсутствия финансирования такие модуляторы в России не выпускаются.

Достоинством профессиональных станций, в которых осуществляется двойное преобразование частот непереустройваемыми канальными конверторами с высокой избирательностью, является малая неравномерность АЧХ ($\pm 0,5$ дБ), а недостатком является невозможность перестройки выходной частоты, что бывает необходимо при многоканальном вещании. В полупрофессиональных станциях без двойного преобразования для обработки принимаемых сигналов используется один конвертор, который переносит спектр каждого канала по первой стандартной промежуточной частоте, которая равна 38,9 МГц. Отрицательный эффект заключается в этом случае в поражении некоторых каналов гетеродином самого конвертора. Использование таких станций допустимо только при трансляции небольшого числа каналов (до 10). Очевидно, что любая станция для средних и больших систем коллективного приема с количеством абонентов более 5000 и любая станция для малых систем при трансляции большого числа каналов должна осуществлять двойное конвертирование частот.

Устройства объединения сигналов

Выходные сигналы процессоров станции суммируются и направляются через общий кабель в распределительную сеть. Перед подачей отдельных несущих в общий кабель необходимо их объединение на выходе головной станции. Производители предоставляют широкий выбор оборудования для объединения сигналов. Это оборудование должно обеспечивать хорошую развязку между отдельными канальными блоками и малые потери. Сумматором (combiner) называется прибор для объединения сигналов, в котором поступающие сигналы с двух или более входов суммируются в одном выходном порте. В качестве сумматоров могут применяться делители, включенные в обратном направлении.

Глава 12. Головная станция

На рис. 12.7 показана наиболее широко используемая схема с делителями и ответвителями. Здесь делители установлены в обратном направлении, противоположном их нормальному включению для разделения сигналов, чтобы улучшить развязку между отдельными канальными блоками обработки сигнала. На рисунке также показана тестовая точка головной станции, которая служит для тестирования и контроля уровня сигнала. В эту схему включен дополнительный направленный ответвитель для подачи специальных тестовых сигналов, например, от генератора развертки для настройки системы. Правильная эксплуатация системы предполагает периодическое измерение и установление нормального уровня сигнала в тестовой точке головной станции наряду с регистрацией этих показаний. Это помогает анализировать проблемы с работой системы, которые могут возникнуть в будущем.

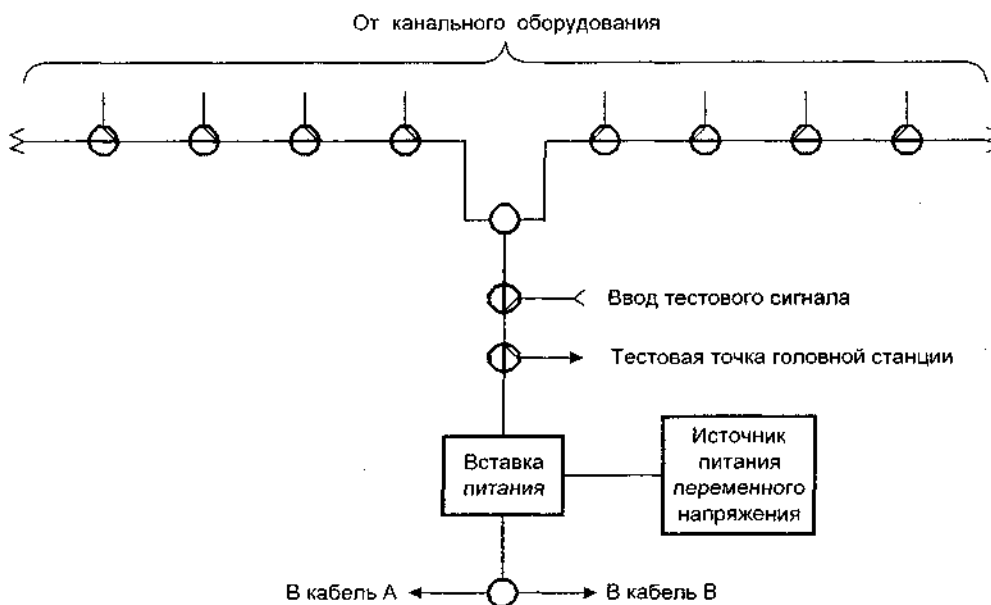


Рис. 12.7. Объединение сигналов на головной станции

Дополнительные функции головной станции

В качестве дополнительной функции головная станция может осуществлять питание кабельной (коаксиальной) сети. В это случае головная станция располагается так, чтобы удобно было устанавливать источники питания переменного напряжения, особенно если на ее выходе сигнал делится для обслуживания нескольких распределительных сетей. В этом случае оборудование головной станции должно быть изолировано по частоте 50 Гц по цепи питания, а делитель должен пропускать ток питания.

Наличие на головной станции встроенной системы автоматического регулирования усиления (АРУ) позволяет формировать стабильный выходной сигнал вне зависимости от погодных условий. Как правило, простейшие станции прямого усиления, состоящие из набора канальных усилителей, не имеют в своем

12.3. Структура и оборудование головных станций

составе системы АРУ. При наличии системы АРУ следует обратить внимание на зависимость коэффициента шума или выходного отношения C/N в зависимости от уровня входного сигнала. Диапазон входных сигналов наземного ТВ указывает на наличие или отсутствие АРУ и позволяет косвенным образом определить отношение сигнал/шум на выходе канального модуля. На раннем этапе развития систем КТВ контрольные несущие для автоматической регулировки (АРУ и АРН) обычно обеспечивались отдельными генераторами, которые устанавливались на головной станции системы. К переносимым системой сигналам добавлялась одна или две несущих, в зависимости от вида авторегулировки. Если продолжать увеличивать канальную нагрузку системы с 12 каналов сначала до 20, потом до 35 и более каналов, обнаруживается, что при использовании для авторегулировки служебных модулированных видеосигналом несущих можно снизить количество сигналов, проходящих через каждый усилитель, снижая таким образом интермодуляционные искажения. Сегодня большинство кабельных усилителей регулируется по видеонесущей телевизионного сигнала.

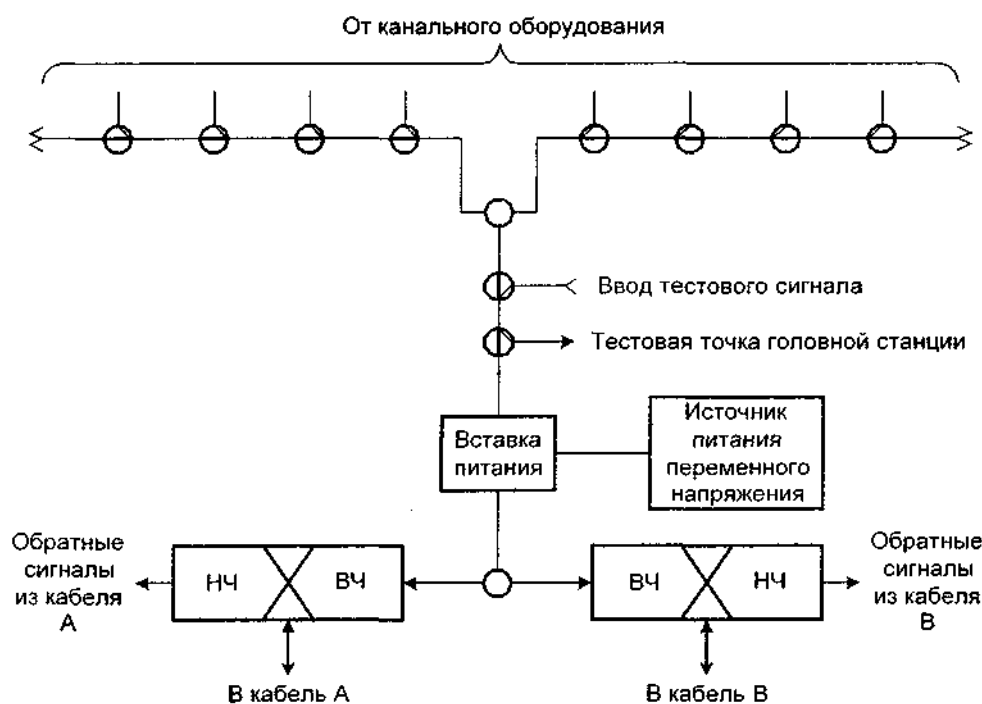


Рис. 12.8. Головная станция двунаправленной системы

В настоящее время почти все системы КТВ проектируются со способностью двунаправленной передачи. Для этого на головной станции необходимо оборудование выделения информации, получаемой по обратному каналу. На рис. 12.8 показан возможный вариант выделения сигналов обратного канала с помощью двунаправленных фильтров, которые включены в оба распределительных кабеля. С технической точки зрения было бы допустимо использовать для выделения сигналов обратного канала двунаправленный фильтр, который рас-

Глава 12. Головная станция

положен на одном из выходов делителя или на выходе единственного кабеля от головной станции. В случае с двумя фильтрами, показанном на рис. 12.8, оба кабеля изолируются с точки зрения обратной передачи. Это обеспечивает необходимую полосу частот в каждом распределительном кабеле, а не один обратный канал не разделяется между всеми направлениями обратной передачи. Кроме того, это позволяет ретранслировать несущие обратной передачи во второй кабель, поскольку оба кабеля изолированы. Это может снизить количество требуемых частот обратного канала и, следовательно, уменьшить стоимость оборудования обратной передачи. Еще одна веская причина изолирования участков системы по обратному направлению передачи заключается в необходимости снижения шума в обратном канале.

На рис. 12.9 показан пример структуры головной станции. В приемном антенном оборудовании СТВ включена фидерная головка с отдельным выходом для каждого направления поляризации, который подключены каждый посредством своего антенного фидера к двум делителям мощности. С выходов делителей сигналы подаются на блоки канальной обработки. Для каждого канала установлен свой канальный блок, способный выполнять демодуляцию, усиление и модуляцию. Канальными блоками выполняется преобразование частот в диапазон, используемый для распределения каналов в кабельной сети. После модуляции сигналы всех каналов объединяются (мультиплексируются) в сумматоре и направляются в распределительную кабельную сеть. На другой вход сумматора подаются сигналы от антенн эфирного вещания НТВ.

12.4. Технические параметры головной станции

При выборе головной станции для системы КТВ следует исходить из следующих критериев, определяющих ее емкость и качество транслируемых сигналов:

- класс системы КТВ (определяет класс станции),
- число обслуживаемых абонентов,
- число транслируемых каналов,
- диапазоны входных и выходных рабочих частот,
- выходное отношение C/N ,
- показатели канальных и диапазонных нелинейных искажений,
- возможность работы в соседних каналах ("канал в канал"),
- показатели линейных искажений,
- многофункциональность (возможность транслировать аналоговые и цифровые ТВ сигналы разных стандартов и сигналы других служб),
- надежность и возможность резервирования каналов,
- поддержка стандарта OIRT D/K,
- стабильность параметров (эксплуатационная и температурная),
- наличие автоматического мониторинга рабочих характеристик модулей станции и кабельной распределительной сети,
- удобство установки, настройки, эксплуатации и обслуживания,
- стоимость станции на канал и на абонента.

Технические параметры головной станции определяют между ее входами и выходом. Величины нормируемых параметров зависят от класса станции. Перечислим наиболее важные характеристики головной станции в соответствии со стандартом EN 50083-5.

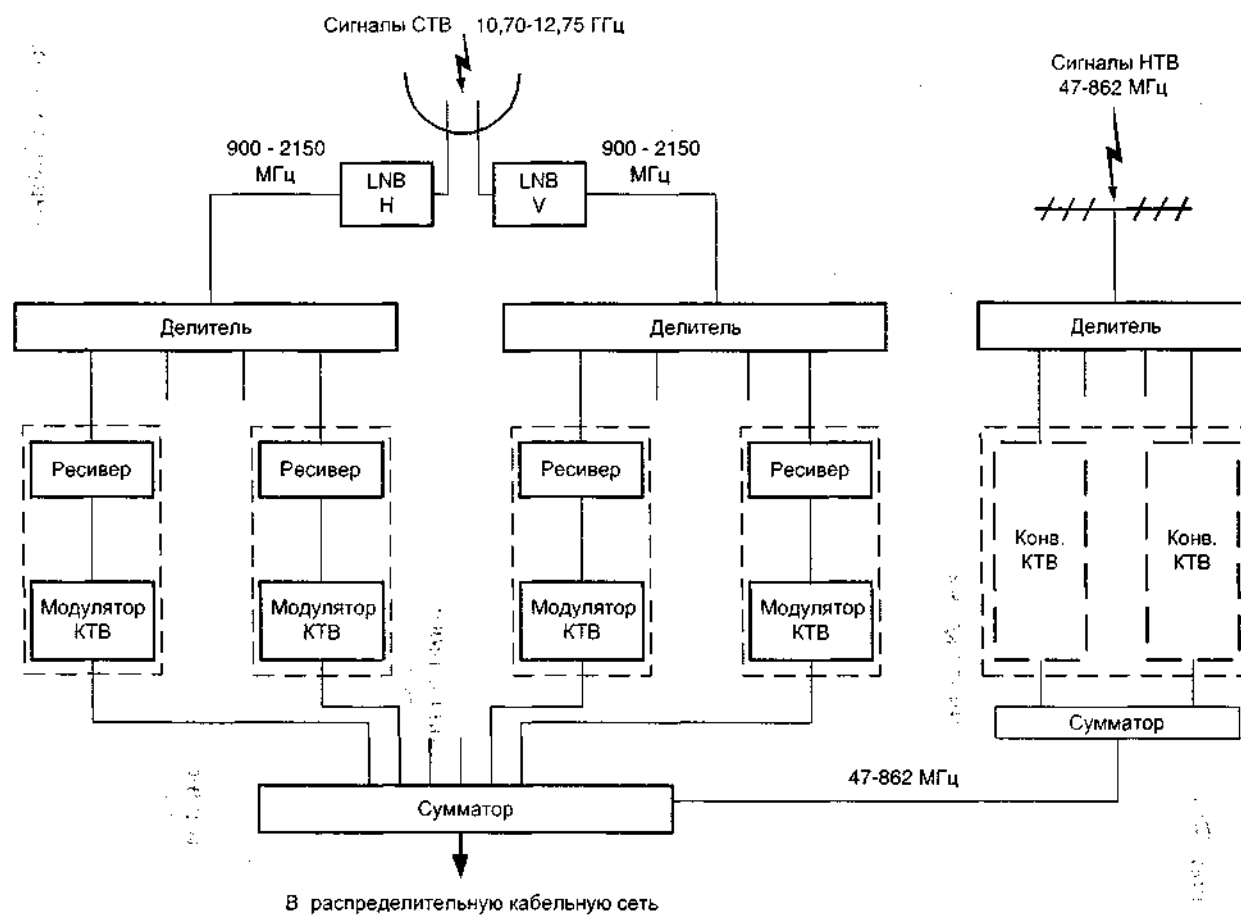


Рис. 12.9. Пример головной станции

Глава 12. Головная станция

Для каналов головной станции с устройствами усиления и конвертирования сигналов диапазонов ТВ вещания и ОВЧ ЧМ нормируются следующие параметры:

- отношение уровня радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{3(K)}$, обусловленной взаимодействием радиосигналов изображения, звукового сопровождения и цветовой поднесущей;
- отношение уровня радиосигнала к побочным помехам в смежных каналах, обусловленным взаимодействием сигналов изображения и звукового сопровождения;
- максимальный уровень выходного радиосигнала, ограниченный отношением уровня сигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{3(K)}$, обусловленной взаимодействием сигналов изображения, звукового сопровождения и цветовой поднесущей;
- отношение уровня радиосигнала к побочным помехам в смежных каналах, которые обусловлены взаимодействием сигналов изображения и звукового сопровождения;
- диапазон входных уровней напряжения сигнала изображения;
- эффективность автоматической регулировки усиления (АРУ);
- диапазон регулировки выходного уровня сигнала;
- неравномерность АЧХ в полосе канала ТВ или ОВЧ ЧМ вещания;
- избирательность в полосах частот смежных, несмежных, зеркальных каналов и в полосе ПЧ телевизора;
- отношение уровня сигнала к уровню фоновой помехи;
- коэффициент шума в канале усиления (конвертирования);
- затухание несогласованности со стороны входа и выхода;
- отклонение несущей частоты сигнала от номинального значения при конвертировании.

Для каналов с устройствами формирования радиосигналов ТВ вещания нормируется следующее:

- размах напряжения полного цветového видеосигнала на входе;
- отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{3(K)}$, обусловленной взаимодействием радиосигналов изображения, звукового сопровождения и цветовой поднесущей;
- отношение радиосигнала изображения к побочным помехам в смежных каналах, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения и звукового сопровождения;
- максимальный уровень напряжения радиосигнала изображения на выходе, определяемый отношением радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка $IMA_{3(K)}$, обусловленной взаимодействием радиосигналов изображения, звукового сопровождения и цветовой поднесущей;
- отношение радиосигнала к побочным помехам в соседних каналах, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения и звукового сопровождения;
- подавление боковых полос телевизионного модулятора;
- отношение радиосигнала изображения к внеполосной помехе;
- отклонение несущей частоты радиосигнала изображения от номинального значения;

12.4. Технические параметры головной станции

- отклонение разности несущих частот радиосигналов изображения и звукового сопровождения от номинального значения;
- сквозная АЧХ канала изображения;
- дифференциальное усиление и дифференциальная фаза канала изображения;
- расхождение во времени сигналов яркости и цветности канала изображения;
- импульсная характеристика (К-фактор) канала изображения;
- нелинейность сигнала яркости канала изображения;
- перекося плоской части прямоугольных импульсов частоты полей и строк;
- отношение радиосигнала изображения к шуму;
- отношение сигнала к фоновой помехе;
- затухание несогласованности со стороны входа телевизионного модулятора;
- уровень мощности (номинальное значение напряжения на согласованной нагрузке) сигнала звукового сопровождения на входе телевизионного модулятора;
- девиация несущей частоты радиосигнала звукового сопровождения;
- нелинейные искажения сигнала звукового сопровождения;
- отклонение АЧХ канала звукового сопровождения от характеристики идеальной цепи предискажений;
- отношение сигнала звукового сопровождения к шуму и фоновой помехе;
- разность уровней напряжения радиосигнала изображения и звукового сопровождения на выходе телевизионного модулятора.

С учетом сложения радиосигналов на выходе головной станции должны быть нормированы:

- разность уровней напряжения радиосигналов изображения;
- отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе в полосе ТВ канала;
- отношение радиосигнала изображения к составным помехам комбинационных частот второго и третьего порядков, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения каналов распределения;
- максимальный уровень напряжения радиосигнала изображения на выходе при допустимом отношении радиосигнала изображения к составным помехам комбинационных частот второго и третьего порядков, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения каналов распределения.

В табл. 12.2 приведен сокращенный перечень параметров, нормируемых для головной станции с устройствами усиления и конвертирования сигналов ТВ вещания.

Вышеперечисленные характеристики и требования к ним являются критериями, определяющими выбор головной станции в системе КТВ. Разумеется, исходить нужно в первую очередь из типа головной станции, рабочей полосы частот, количества абонентов и канальное емкости. Далее необходим тщательный комплексный анализ параметров и характеристик с учетом стоимости. Анализируя параметры головных станций, можно сделать ряд выводов.

1. При оценке параметров головной станции необходимо различать условия приема сигналов спутникового телевизионного вещания (СТВ) и сигналов наземного телевизионного вещания (НТВ), поскольку они различаются методами модуляции сигнала и диапазонами частот. Спутниковые станции передают сигнал в частотной модуляции (или фазовой), а наземные станции передают, как

Глава 12. Головная станция

правило, сигнал в амплитудной модуляции. Соответственно, и диапазоны частот передачи для этих двух видов эфирных источников различаются.

Таблица 12.2

Параметры головной станции

Параметр	Значение
Отношение радиосигнала изображения к одночастотной помехе комбинационных частот третьего порядка IMA_3 , обусловленной взаимодействием радиосигналов изображения, звука и цвета, не менее (в зависимости от класса станции)	54 – 66 дБ
Отношение сигнала изображения к побочным помехам, обусловленным взаимодействием радиосигналов изображения и звука (на частотах ниже несущей изображения на 6,5 МГц и выше на 13 МГц) при работе в смежных каналах, не менее	57 дБ
Диапазон регулировки выходного уровня напряжения радиосигнала, не менее	10 дБ
Неравномерность АЧХ канала распределения, не более:	
– в полосе частот канала от несущей изображения до верхней граничной частоты канала;	2 дБ
– в пределах полосы частот 0,5 МГц канала от несущей изображения до верхней граничной частоты канала;	0,5 дБ
– в полосе канала распределения радиосигналов ОВЧ ЧМ вещания (для устройств обеспечивающих канальное конвертирование и усиление сигналов ОВЧ ЧМ вещания);	2 дБ
– в пределах полосы частот 10 кГц канала распределения радиосигнала ОВЧ ЧМ вещания в полосе частот ± 75 кГц относительно несущей частоты	0,3 дБ
Избирательность, не менее:	
– в полосе верхней граничной частоты канала распределения ± 8 МГц (без смежных каналов);	57 дБ
– на верхней граничной частоте канала распределения ± 8 МГц при усилении радиосигналов вещательного телевидения в ТВ канальных усилителях;	30 дБ
– в полосе частот зеркального канала приема;	57 дБ
– в диапазоне частот 40 – 300 МГц;	50 дБ
– в диапазоне частот 300 – 1000 МГц	60 дБ
Отношение сигнала к фоновой помехе, не менее	52 дБ
Коэффициент шума на входе канального усилителя или конвертора, не более:	
– в полосе частот 40 – 300 МГц	10 дБ
– в полосе частот 300 – 1000 МГц	12 дБ

2. Выходное отношение сигнал/шум (C/N) является основным критерием выбора головной станции при большой протяженности распределительных магистралей. При трансляции большого числа каналов необходимо учитывать фактор снижения выходного C/N по сравнению со значением для одного канала в силу неидеальной избирательности выходных канальных фильтров. При выборе при-

12.4. Технические параметры головной станции

емника сигналов СТВ обращают внимание не столько на его шумовой порог, сколько на достижимое значение C/N на его выходе. Уровень входных сигналов СТВ не оказывает существенного влияния на выходное отношение C/N и должен быть не ниже порогового уровня, приводимого в документации приемника. Для приема сигналов НТВ необходим расчет требуемых минимальных уровней на выходе приемной антенны при различных коэффициентах шума F антенного усилителя. Пример расчета (для C/N на выходе спутникового приемника 54 дБ) приведен в табл. 12.3. Смысл расчета в том, чтобы показать, что чем больше коэффициент шума усилителя, тем выше должен быть уровень сигнала на выходе антенны.

Таблица 12.3

Требуемый уровень сигнала на выходе антенны

Канал	Несущая изображения, МГц	S_d , дБ-мВ			
		$F = 0$ дБ	$F = 2$ дБ	$F = 6$ дБ	$F = 10$ дБ
PI	49,75	13,4	13,5	13,7	14,1
R3	77,25	9,8	9,9	10,3	11,3
R6	175,25	3,2	3,7	5,3	7,8
RII	215,25	1,8	2,5	4,5	7,4
K24	495,25	-2,6	-0,9	2,7	6,5
K38	607,25	-3,2	-1,4	2,5	6,5

Если коэффициент шума антенного усилителя не известен, его следует принимать равным 10 дБ для диапазонов МВ и 12 дБ для диапазонов ДМВ, так как в большинстве случаев на входе конвертора установлен всеволновой селектор телевизионных каналов. При наличии входных защитных устройств эти значения следует увеличить на 2 дБ. При формировании сигналов СТВ и НТВ необходимо учитывать, что после приемника могут быть включены различные активные распределительные устройства, усилители и конверторы с собственными значениями C/N , поэтому отношение, полученное на выходе приемника уменьшится. Таким образом, итоговое отношение C/N головной станции будет меньше. Снижение будет наблюдаться после включения каждого активного устройства, при этом собственное отношение сигнал/шум каждого из активных устройств можно приблизительно определить по уже известной формуле:

$$C/N_{\text{вх}} = S_{\text{вх}} - S_{\text{ш,вх}} = S_{\text{вх}} - S_{\text{ш0}} - F,$$

где $S_{\text{вх}}$ – входной уровень сигнала активного устройства, F – коэффициент шума активного устройства, $S_{\text{ш0}}$ – входной пороговый шум (2,4 дБ-мкВ или -58 дБ-мВ). Способы расчета и измерения C/N были рассмотрены в гл. 5.

3. О показателях искажений уже было достаточно сказано в главе 6, поэтому коротко укажем только на основные моменты. Показатель канальной интермодуляции является критерием оценки максимальных входных и выгодных уровней каждого канального модуля. Возникновение канальной интермодуляции обусловлено взаимодействием в активных элементах обработки канала звуковой и цветовой несущей с несущей изображения. Способы измерения канальной интермодуляции предусмотрены стандартами ГОСТ Р 52023-2003 и EN-

Глава 12. Головная станция

50083. Согласно последнему, максимальный выходной уровень определяется напряжением, при котором отношение уровня несущей изображения к уровню помехи комбинационных частот третьего порядка составит 60 дБ. Показатель кроссмодуляции характеризует уровень помехи, возникающей на выходе головной станции в результате взаимодействия сигналов двух и более каналов. Кроссмодуляция возникает в выходном широкополосном усилителе, на выходном сумматоре, в качестве которого используется многопортовый делитель. Для снижения кроссмодуляции необходимо увеличить величину развязки между выходами отдельных каналов. Этого можно достичь, например, включением высокоизбирательных полосовых фильтров на выходах повышающих конверторов. В профессиональных станциях в качестве выходного сумматора используется набор направленных ответвителей с высоким ответвлением (не менее 36 дБ) с дополнительной установкой на выходе каждого конвертора канальных фильтров. Помимо нелинейных искажений необходимо уделить внимание линейным искажениям, особенно ГВЗ, так как именно этот параметр в основном определяет четкость изображения. Линейные искажения на головной станции в основном связаны с зависимостью коэффициента усиления от частоты. Канальное групповое время задержки (ГВЗ) должно быть максимально равномерным в полосе телевизионного канала. Суммарное ГВЗ всех канальных модулей станции не должно превышать 60 нс.

4. Число транслируемых каналов является параметром, зависящим от нескольких характеристик. Прежде всего, это диапазон рабочих частот. Диапазон входных сигналов СТВ определяется выбором малошумящего понижающего конвертора LNB нужного диапазона (С или Ku). Диапазон входных сигналов НТВ обеспечивается большинством станций. При большом числе каналов необходимо обратить внимание на качество канальных процессоров, так как полный диапазон выходных частот поддерживается далеко не всеми станциями из-за сложности и высокой стоимости конверторов с перестройкой частоты. Настройка канальных модуляторов головной станции выполняется в соответствии с частотным планом создаваемой системы КТВ. При этом надо понимать, какие частоты каналов можно использовать на выходе головной станции, а какие нельзя. В непрофессиональных станциях с недостаточной избирательностью по соседнему каналу невозможна расстановка каналов на соседних частотах "канал в канал". Возможность работы в соседних каналах зависит не от диапазона конвертирования при обработке сигналов наземного и спутникового ТВ вещания, а от типа и качества используемого модулятора, в первую очередь от уровня внеполосных продуктов модуляции на его выходе. О частотном планировании рассказывалось в гл. 2. В диапазоне МВ нужно обращать внимание каналы $n \pm 4$ для стандарта OIRT и каналов $n \pm 5$ для стандарта CCIR, поскольку они могут оказаться пораженными. В диапазонах ДМВ при использовании модулей со сплошным частотным перекрытием следует обратить внимание на уровни ложных сигналов в каналах $n \pm 9$ для OIRT и $n \pm 11$ для CCIR. Отношение уровня несущей к уровню ложных сигналов является важным параметром при значительном числе транслируемых каналов (более 20), определяющим возможность использования соседних и зеркальных каналов или каналов совпадающих по частоте с частотой гетеродина любого из конверторов. При использовании качественных профессиональных станций частотное планирование можно проводить относительно свободно.

5. Канальная емкость любой станции ограничена, поэтому для увеличения числа каналов применяют каскадирование – если емкости одной станции недостаточно, устанавливается еще одна. Выходные сигналы всех станций (всех

12.4. Технические параметры головной станции

каналов) суммируются, усиливаются широкополосным усилителем и затем подаются в распределительную сеть.

Поскольку каналы СТВ с точки зрения передачи по сети ничем не отличаются от каналов НТВ, то одну распределительную сеть можно использовать без каких-либо ограничений, если сигналы не распределяются в модуляции QPSK, когда все элементы распределительной сети должны иметь полосу 5 – 2150 МГц. Каскадируемые станции с наращиваемой канальной емкостью позволяют построить широкополосную систему с трансляцией до 40 каналов. Однако применение таких станций в системах с большим количеством абонентов может ограничиваться, поскольку наращивание емкости станции путем каскадирования модулей вносит дополнительную неравномерность в АЧХ, затрудняет достижение необходимого подавления внеполосных продуктов модуляторов, а наличие широкополосного усилителя на группу модулей может увеличивать интермодуляционные искажения.

6. Для крупных систем КТВ центральная станция должна обеспечивать резервирование каналов. Возможность резервирования каналов определяется условиями эксплуатации станции. Различают резервирование по направлению и по назначению, второе обычно называется резервированием "n + 1". Резервирование по направлениям позволяет создать в системе аварийный канал и может быть сделано как по низкой частоте аудио-видео сигнала, так и по стандартной ПЧ, чтобы при необходимости передачи важной информации по всем каналам можно было транслировать одну и ту же программу. Резервирование по назначению более экономично, но требует соответствующего программного управления, поскольку один резервный канальный модуль будет находиться в дежурном режиме для нескольких каналов. Отдельный резервный канал должен выделяться для сигналов НТВ и СТВ.

7. О качестве станции можно судить не только по значениям, но и по количеству нормируемых технических параметров. Дополнительные параметры, которыми, как правило, характеризуются профессиональные станции, важны при построении широкополосных сетей с обратным каналом и гибридной волоконно-оптической архитектурой (HFC), которая сейчас является наиболее перспективной, и фактически уже стала основой для создания больших систем КТВ. Для профессиональных станций с возможностью оптической передачи задаются параметры C/N, СТВ и CSO отдельно для прямого канала (47 – 862 МГц) и обратного канала (5 – 30 МГц). Наряду с техническими параметрами не менее важными факторами является надежность, стабильность параметров, возможность расширения и модернизации станции без существенных затрат.

Экономичность головной станции оценивается, как правило, стоимостью на канал или(и) стоимостью на абонента. Средняя стоимость полупрофессиональной станции составляет 400 – 500 долл. на канал. Для создания системы КТВ небольшого и среднего масштаба (до 5000 абонентов) обычно выбираются универсальные станции. Большинство строящихся в настоящее время систем можно отнести как раз к системам среднего масштаба, так как они являются наиболее эффективными по соотношению цена-качество. С выхода такой станции, как правило, транслируются одновременно каналы СТВ и НТВ, хотя для приема сигналов НТВ может быть установлена и отдельная головная станция.

Для построения крупных систем КТВ и КСКПТ (более 10000 абонентов) большей протяженности, трансляцией большого числа каналов СТВ и НТВ (более 40) потребуются профессиональная станция со встроенной системой АРУ, дистанционным мониторингом и управлением. Таким требованиям удовлетворяют, например, станции Karin фирмы Hirschmann и SCA-600 фирмы Teleste,

которые могут быть использованы в качестве станции сегмента (района) или центральной станции в крупном городе. Для трансляции в создания большой или средней системы с меньшим числом каналов также будет нужна профессиональная станция, например, для этой цели подойдет CSE-7500 Hirschmann. Для средних систем с небольшим числом каналов в городских условиях подойдет станция со встроенной системой АРУ и двойным преобразованием частоты, например, полупрофессиональная CSE-3100 Hirschmann или OV-50 WISL. Для небольших станций с небольшим и средним числом каналов НТВ подойдет станция прямого усиления без системы АРУ SCA-300 Teleste, а для каналов СТВ станция CSE-100.

12.5. Защита оборудования головной станции

Все оборудование головной станции должно быть соответствующим образом заземлено. Требования по электрической защите также приведены в стандарте EN-50083. Если здание, в котором размещена станция, оборудовано системой защиты от молний (IEC 1024-1), то мачта антенны, являющаяся металлическим сооружением, должна быть соединена с системой защиты от молний с помощью наиболее короткого соединения и заземляющего проводника. Наружные проводники всех коаксиальных кабелей, идущих от антенны, должны быть соединены с мачтой через эквипотенциальный соединяющий медный проводник, имеющий минимальное поперечное сечение 4 мм^2 . Если здание не оборудовано такой системой, мачта и коаксиальные кабели наружных проводников должны быть заземлены в соответствии с требованиями стандарта. Для индивидуальных приёмных систем или систем MATV, ограниченных одним зданием, из-за невысокой вероятности попадания молнии можно обойтись без системы защиты от молнии, если это разрешено местными органами надзора. В любом случае установка системы защиты от молнии рекомендуется.

Механизм заземления и соединения с антенной системой состоит в следующем. Мачта соединяется с землей при помощи заземляющего проводника. Наружные проводники коаксиальных кабелей, приходящих от антенны, соединяются с мачтой или заземляющим проводником посредством эквипотенциального соединения медным проводником с минимальным сечением 4 мм^2 . Заземляющие проводники должны устанавливаться прямо и вертикально, так, чтобы обеспечить наиболее короткий и прямой путь тока к заземляющей системе, реализованной одним из трех способов. Первый способ – соединение с системой защиты от молний на здании. Второй способ – соединение с системой заземления на здании. Третий – соединение как минимум с двумя горизонтальными электродами длиной не менее 5 м и вертикальным или наклонным электродом длиной не менее 2,5 м, погруженным на глубину не менее 0,5 м, на расстоянии не менее 1 м от стены. Минимальная площадь поперечного сечения каждого электрода должна быть 50 мм^2 для медного электрода или 80 мм^2 для железного. Также могут быть использованы такие элементы как, например, взаимосвязанные бетонные арматурные структуры или другие подходящие подземные металлические конструкции, входящие в фундамент здания, размеры которых должны находиться в указанных выше пределах. При заземлении исключается следующее: запрещается использовать для заземления защитные заземляющие или нейтральные проводники любых источников электричества и наружные проводники любых коаксиальных кабелей.

Кроме электрической защиты необходима механическая защита оборудования станции. Стандарт определяет способы повышения механической ста-

бильности наружной антенной системы, включая спутниковые антенны. Все части антенной системы должны быть сконструированы таким образом, чтобы выдерживать максимальную расчетную ветровую нагрузку без поломок и отрыва компонентов. Для антенных систем со свободной длиной мачты максимум 6 м изгибающий момент в точке фиксации не должен превышать 1650 Н·м. Сюда должна также включаться ветровая нагрузка мачты. Фиксированная часть мачты должна составлять не менее одной шестой полной длины. В случае, если длина мачты превышает 6 м или изгибающий момент может превысить 1650 Нм, следует воспользоваться услугами эксперта, который может дать гарантию безопасности структуры. Дополнительно может быть введено требование к устойчивости площадки, с помощью которой мачта крепится к зданию. Показателем механической защиты антенного комплекса является изгибающий момент антенной мачты. Сначала рассчитывается величина ветровой нагрузки, действующей на мачтовую антенну, через ветровое давление и площадь поверхности антенны. Ветровая нагрузка измеряется в Ньютонах (Н), а ветровое давление – в Паскалях (Н/м²). Величина ветрового давления зависит от скорости ветра и высоты установки антенны над землей. Нагрузку, возникающую из-за снега или льда, необходимо считать отдельно. В зависимости от местных погодных условий величина ветровой нагрузки может приниматься более или менее высокой и составлять от 700 до 2000 Н/м². Затем рассчитывается изгибающий момент как произведение высоты мачты и величины ветровой нагрузки.

Резюме

Состав и тип головного оборудования полностью определяются требованиями к типу и масштабу проектируемой системы КТВ. Наиболее важным параметром головной станции является выходное отношение С/Н, которое определяет в конечном счете достижимый размер области обслуживания системы, т.е. число ее абонентов и предельную протяженность транспортных и магистральных линий передачи. Возможность спутникового приема на головной станции существенно расширяет возможности системы КТВ.

Источником сигнала для любой головной станции может быть обычный эфирный передатчик диапазона МВ/ДВМ, спутниковый передатчик или головная станция более высокого уровня распределительной системы. В архитектуре систем КТВ различаются центральная, узловая и местная головная станция. Узловая головная станция системы, как правило, связана с центральной станцией посредством волоконно-оптической линии передачи и является, по существу, оптическим приемником, преобразующим оптические сигналы в электрические для подачи в коаксиальную сеть. О таких устройствах будем говорить далее при обсуждении оптической передачи и гибридных сетей.

Техническое обслуживание оборудования станции КТВ заключается главным образом в наблюдении и периодической проверке уровня и качества принимаемого сигнала, для чего обслуживающий персонал головной станции осуществляет круглосуточный контроль программ. Система может быть оснащена устройством автоматического мониторинга сигнала для облегчения контроля качества сигнала. Появление новых технологий обработки и управления в сети, применение кодирования, удаленное управление статусом абонентов и адресный контроль их подключения и отключения поднимают головные станции на новый функциональный уровень.

Глава 13

УРОВЕНЬ СИГНАЛА И КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ

В конечном счете, шум и искажения определяют качество передачи во всей системе КТВ, которое, что очень важно, не только должно соответствовать заданным показателям на этапе разработке системы, но и в действительности поддерживаться на протяжении всего периода эксплуатации. Качественными показателями системы являются показатели C/N , IMD, XMD. Всеми усилителями должны поддерживаться достаточно высокие уровни сигналов, чтобы обеспечить приемлемое отношение C/N в оконечных точках системы. С другой стороны, важно поддерживать выходные уровни усилителей достаточно низкими, чтобы гарантировать, что в оконечных точках системы нелинейные искажения будут приемлемыми. Таким образом, требование высокого C/N (высокого усиления сигнала) находится в противоречии с требованием низких IMD, XMD в системе передачи. Разработчик должен так выбрать такое усиление и такие уровни передачи в системе, при которых оптимально сочетались бы оба эти условия с точки зрения обеспечения удовлетворительного качества приема в оконечных точках системы. В этой главе рассмотрим способ расчета оптимального выходного уровня и оптимального коэффициента усиления в зависимости от требуемых качественных показателей системы.

Не имеет принципиального значения, в каких единицах измерять уровни передачи сигналов – “дБ·мВ” или “дБ·мкВ” – в гл. 2 дано правило однозначного перевода одних единиц в другие. Здесь при расчетах уровней сигналов будем пользоваться единицами “дБ·мВ”.

Обратите внимание, что во всех примерах, которые будут встречаться в этой главе, для оценки показателей кабельной системы берутся крайние значения параметров, которые возможно и не встретятся в реальной ситуации. В частности, вряд ли количество усилителей в магистрали будет превышать 15. Потери и количество усилителей в магистральном каскаде намеренно завышены, чтобы продемонстрировать потенциальные возможности оборудования и динамику изменения качественных показателей систем большого масштаба.

13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи

Входной уровень, выходной уровень и коэффициент усиления усилителя однозначно связаны между собой, поэтому нет необходимости использовать в расчетах все эти три характеристики. Достаточно учитывать только выходной уровень и коэффициент усиления. Все качественные показатели нелинейных искажений напрямую зависят от выходного уровня, а зависимость показателя шума от выходного уровня легко выражается через приведенный динамический диапазон (выходное отношение C/N). Поскольку коэффициент усиления K и коэффициент шума F определенного типа усилителя фиксированы, менять качественные показатели системы разработчик может только путем изменения

13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи

выходных уровней активного оборудования. Регулируя этот фактор, разработчик должен получить приемлемые качественные показатели в оконечных точках системы. Если же получить желаемые показатели таким способом не удастся, остается возможность выбора другого оборудования с другими характеристиками, что, очевидно, повлечет изменение качественных показателей. Таким образом, разработчик должен найти оптимальные уровни передачи при заданных требованиях к качеству передачи и известных характеристиках активного оборудования.

Приемлемым качеством считается отсутствие видимых нарушений или искажений в передаваемом телевизионном изображении. Существуют и другие факторы, которые могут вносить видимые помехи в ТВ изображение, например, отражения в системе передачи или фоновая модуляция, но гораздо более существенной и распространенной причиной ухудшения качества изображения является именно шум и нелинейные искажения. В системе, эксплуатируемой долгое время, множество различных факторов может приводить к постепенному ухудшению качества передачи. Одним из факторов являются сезонные колебания температуры, которые могут вызвать изменение потерь в кабеле. Даже замена отработавшего оборудования может создавать нежелательные отклонения рабочих уровней сигналов, ухудшая качество передачи, а на протяжении длительной эксплуатации такие замены могут быть необходимы.

Основные структурные элементы системы КТВ уже были определены во вводной главе. Важнейшим элементом является головная станция, обеспечивающая эфирный прием сигнала, его обработку и подачу на вход распределительной кабельной сети. Последняя включает несколько магистральных и домовых распределительных сетей. Радиорелейное звено, участвующее в передаче сигнала на удаленную распределительную кабельную структуру, является еще одним отдельным элементом. Вместо радиорелейного звена в систему КТВ может быть включена транспортная линия на основе оптического кабеля. Внутри распределительной кабельной сети также можно выделить определенно различные элементы, к которым относятся транковая подсистема и следующая за ней фидерная подсистема.

На рис. 13.1 показаны элементы кабельной системы:

- центральная головная станция,
- узловая головная станция,
- распределительная кабельная сеть А,
- распределительная кабельная сеть В,
- радиорелейное транспортное звено,
- волоконно-оптическое транспортное звено.

Все названные элементы системы влияют на проходящие через них сигналы, внося некоторый шум и создавая нелинейные искажения. Различные элементы, в зависимости от используемой в них технологии передачи сигнала, вносят искажения в большей или меньшей степени. Некоторые элементы системы более ответственны за изменение качества передачи, чем другие. Например, оборудование головных станций имеет широкий динамический диапазон и очень чувствительное АРУ, поэтому качество сигнала, распространяющегося от головной станции, наиболее стабильно и предсказуемо. Следовательно, головные станции менее всех прочих элементов ухудшают показатели качества. Кабельная сеть, напротив, подвержена влиянию множества изменяющихся факторов, таких как температура, флуктуации напряже-

ния источника питания и даже неправильная настройка оборудования обслуживающим персоналом. Поэтому, если необходимо сохранить качество передачи постоянным по всей системе, то следует установить некоторые разумные ограничения для изменяющихся факторов. И, очевидно, показатели тех элементов системы, которые в наибольшей степени подвержены влиянию изменяющихся факторов, нуждаются в наиболее жестких ограничениях. Получившиеся в результате показатели шума и интермодуляции могут быть легко измерены в оконечных точках системы для наиболее удаленных абонентских терминалов. Если не принимать ограничительных мер, то накопленный в системе шум от всех ее элементов в некоторой точке достигнет такого уровня, при котором он станет заметным в телевизионном изображении. Это также относится и к интермодуляции.

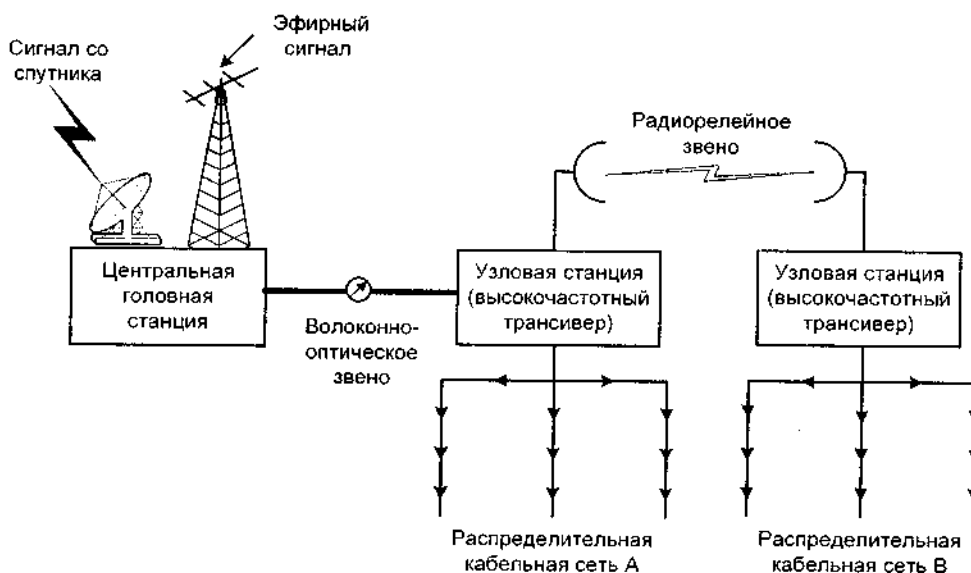


Рис. 13.1. Элементы системы КТВ

Транспортные линии кабельной системы специально предназначены для переноса сигналов на большие расстояния из точки расположения центральной головной станции к точке начала магистральной сети (например, к оптическому приемнику, устанавливаемому на узловой головной станции) и между узловыми станциями. В транспортной системе нет кабельных ответвлений и сети распределения. В последнее время она строится почти исключительно на основе ВОСП, поэтому вопрос усиления не касается этой части линейного тракта. Радиорелейное звено между узловыми станциями изображено только, чтобы показать, что такая возможность есть. Центральная головная станция принимает сигналы от разных источников и для каждого источника используется свое оборудование обработки сигналов. В ее состав входят устройства спутникового и эфирного приема, но, кроме них, могут присутствовать и дополнительные источники сигналов, такие как местные телевизионные студии. Все эти источники создают различные шумы и в системе. Однако, в целях упрощения процесса

13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи

проектирования, можно рассчитывать на худший случай, т.е. принять худшее из всех значений шума, вносимого поступающими на головную станцию сигналами, (худшее отношение C/N) за значение C/N самой головной станции. Показатель интермодуляции не является существенной характеристикой для головной станции. Поскольку на головной станции обработка сигналов каждого отдельного вида обычно делается на индивидуальном одноканальном оборудовании, то каких-либо заметных интермодуляционных искажений здесь не появляется.

Наибольшую долю шума и интермодуляции в системе создает распределительная кабельная сеть. Долговременная поддержка постоянных уровней сигналов в разумных пределах является первостепенной задачей для этого элемента системы. Поэтому, если в проект системы закладываются некоторые границы допустимых помех, то эти границы должны в равной степени обеспечивать постоянство как входных уровней (ограничение по C/N), так и выходных уровней (ограничение по СХМ и СТВ). Поскольку усиление уже определено в проекте выбором усилителя, то любое изменение входных уровней будет влиять на выходные уровни. Возможно, это влияние будет ослаблено устройствами АРУ усилителей, но тем не менее оно будет присутствовать. Поскольку на систему действуют такие условия, изменение которых будет способствовать как увеличению уровней в системе (понижение температуры), так и уменьшению уровней в системе (повышение температуры), то следует установить равные границы для защиты от тех и от других условий.

Заметим, что не является обязательным условием строгое нормирование входных и выходных характеристик каждого элемента системы в равной мере. Например, поскольку радиорелейное звено обычно обладает существенным уровнем шума, но очень низкой интермодуляцией, то существенными для него будут только входные характеристики.

Характеристики системы в целом или, иначе говоря, итоговые показатели в конечных точках системы, учитывающие необходимость обслуживания самой удаленной абонентской станции, будут отражать процесс накопления шума и интермодуляции от всех элементов системы. Эти показатели и будем сравнивать в ходе проектирования с требуемыми значениями показателей шума и интермодуляции в конечных точках системы. Причем, определяя характеристики для каждого структурного элемента системы, значительно упрощаем проблему проектирования системы в целом. Например, зная количество, места расположения и рабочие характеристики усилителей, используемых в кабельной распределительной сети А, можно сформировать спецификацию кабельной распределительной сети А как отдельного структурного элемента системы и далее пользоваться ею в расчетах показателей всей системы. Составив такие же спецификации для других кабельных сетей, для головной станции и транспортной системы, облегчаем разработку проекта. Для измерения и контроля характеристик любого структурного элемента с целью их согласования с общими требованиями к характеристикам в конечных точках системы нужно последовательно установить специальные интерфейсные точки по всей системе.

В табл. 13.1 определены приблизительные характеристики элементов системы, образующие спецификацию системы в целом.

Волоконно-оптическое звено имеет несравнимо лучшие показатели по сравнению с другими элементами системы. Допустим сейчас, что его влиянием можно пренебречь и рассмотрим только наиболее критичные элементы системы, влияние которых нельзя не учитывать ни при каких условиях.

Таблица 13.1

Показатели элементов системы

Элемент системы	C/N, дБ	CXM, дБ
Головная станция	53	–
Кабельная сеть А	43	52
Кабельная сеть В	43	52
Радиорелейное звено	53	82

Вычислим характеристики в оконечных точках обеих распределительных кабельных сетей. Ясно, что в отличие от сети А, сеть В будет подвергаться воздействию шума и интермодуляции от радиорелейного участка.

Показатели системы в целом можно определить аналитически или методом комбинирования. Используя диаграмму для комбинирования отношений C/N из гл. 5 (рис. 5.4), получим общее отношение C/N головной станции и кабельной сети А. Результат составляет 42,6 дБ. Поскольку головная станция не вносит значительной кроссмодуляции, то действительное значение показателя кроссмодуляции системы будет равно значению интермодуляции от кабельной сети А, которое составляет 52 дБ (см. табл. 13.1).

В случае В систему образуют три элемента (головная станция, радиорелейный участок и кабельная сеть В). С помощью диаграммы (рис. 5.4) комбинируем отношения C/N этих трех элементов. Сперва можно комбинировать значения C/N любых двух элементов, а затем комбинировать результат с C/N оставшегося элемента. Из табл. 13.1 видно, что головная станция и радиорелейный участок имеют одинаковые C/N, равные 53 дБ. В гл. 5 было показано, что комбинирование равных значений C/N дает в результате значение, меньшее на 3 дБ, чем каждое комбинируемое. Поэтому можно, не пользуясь диаграммой, сразу определить, что результирующее значение C/N равно 50 дБ. Далее для комбинирования этого значения со значением C/N кабельной сети В, которое равно 43 дБ, снова воспользуемся диаграммой приведенной на рис. 5.4. В результате получим, что общее значение C/N всей системы, включающей сеть В, равно 42,2 дБ. Так как кроссмодуляцией в головной станции пренебрегаем, то для получения полного значения CXM системы в целом необходимо комбинировать только значения кроссмодуляции от радиорелейного звена (82 дБ) и кабельной сети В (52 дБ). С помощью диаграммы для комбинирования значений CXM из гл. 6 (рис. 6.5) получим, что показатель кроссмодуляции системы в случае В равен 51,7 дБ. Результаты этих расчетов приведены в табл. 13.2.

Сравнивая характеристики сетей А и В, видим, что различие между ними не очень велико, но оно существует. Если проанализировать это различие, можно сделать следующий вывод. Если разница между двумя комбинируемыми значениями C/N или CXM велика, то результат оказывается ближе к худшему значению и отклонение результата от этого худшего значения оказывается небольшим.

Оборудование головной станции и радиорелейный участок имеют существенно лучшие значения C/N и CXM, чем распределительная сеть, поэтому в реальных системах главным источником помех обоих типов обычно является

13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи

распределительная коаксиальная кабельная сеть. Это также справедливо для случая добавления одного усилителя к каскаду из нескольких усилителей.

Таблица 13.2

Результаты расчета

Показатель	Сеть А	Сеть В
C/N	42,6 дБ	42,2 дБ
CXМ	52 дБ	51,7 дБ

Интермодуляция и шум, вносимые одним усилителем настолько малы по сравнению с C/N и CXМ всего каскада, например из 15 блоков, что влияние этого усилителя на оконечные характеристики системы будет минимальным.

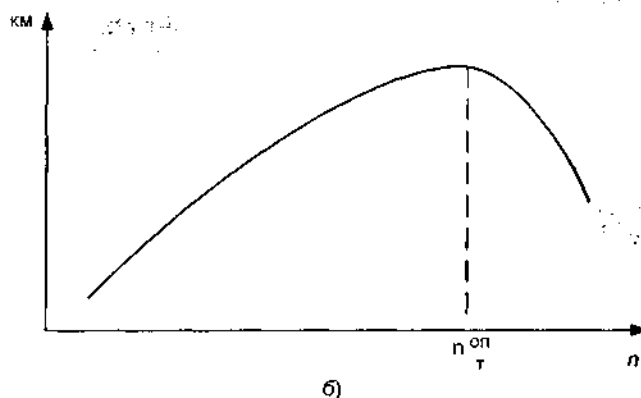
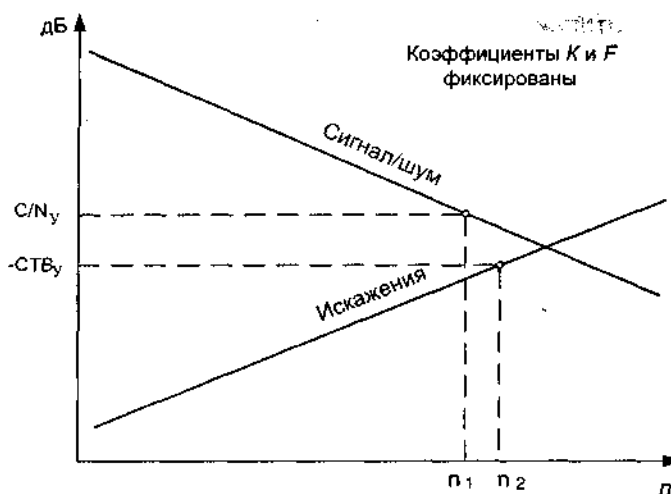


Рис. 13.2. Шум и искажения в каскаде усилителей:
а – показатели шума и искажений магистрали; б – допустимая протяженность магистрали

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

Предположим, что система (см. рис. 13.1) имеет в своем составе магистральную кабельную структуру. Если в магистрали требуется создать большой каскад, например из 15 усилителей, то должны очень тщательно рассчитывать его характеристики, чтобы минимизировать C/N и СХМ. Возможно, придется накладывать более жесткие условия на разработку всей кабельной распределительной сети В, что приведет к увеличению стоимости. При проектировании подобной системы общепринято устанавливать для головной станции отношение C/N , по крайней мере на 10 дБ лучше, чем для подключенной к ней кабельной сети. Если абоненты сообщают о появлении "эффекта стеклоочистителя" в виде движущихся диагональных полос на экране телевизора, что указывает на рост интермодуляции в системе, то наиболее вероятно, что проблема вовсе не в головной станции, а в кабельной сети. Если же сообщается о шуме или "снеге" только на одном канале, то можно определенно сказать, что проблема не в кабельной сети.

На рис. 13.2,а показано, как с ростом протяженности кабельной сети (увеличения числа усилителей в каскаде) оконечные показатели качества системы неизбежно ухудшаются. Усиление при этом считается постоянным. Под искажениями здесь понимается любой вид интермодуляции или кроссмодуляции, вид зависимости будет тем же. Заметим, что здесь показана величина самих искажений, т.е. величина, обратная показателям IMD и XMD, которые, напомним, являются отношениями уровня сигнала к уровню искажения. Физические свойства каскада усилителей не позволяют устранить причину ухудшения качества передачи – удваивая количество усилителей в каскаде, всегда ухудшаем значения C/N и CSO на 3 дБ, а значения СТВ и СХМ на 6 дБ. Но влиять на величину ухудшения можно путем разумного выбора выходных уровней и изменения коэффициентов усиления и шума усилителей. Регулируя последние два параметра, можно в определенных пределах минимизировать ухудшение качества, хотя и за счет роста стоимости оборудования.

Аналогичная ситуация будет наблюдаться и в случае, когда исследуется зависимость отношения C/N и величины искажений от количества передаваемых каналов. Т.е., если по горизонтальной оси отложить не количество усилителей в каскаде, а количество каналов, то при увеличении количества каналов итоговое отношение C/N системы передачи также будет падать, а уровень искажений будет расти. Зависимости изображены на рисунке схематично как линейные, но в общем случае они являются нелинейными, как будет показано далее. В данном случае имеет значение только характер зависимостей. Характер зависимостей одинаков, так как в обоих случаях – при увеличении числа усилителей в каскаде и при увеличении числа каналов – уменьшается достижимый рабочий уровень сигнала в системе. Этим и объясняется основной механизм, ограничивающий возможность наращивания емкости кабельной системы передачи.

Допустим, в оконечных точках системы требуется получить показатель C/N не менее 41 дБ. Если выбор коэффициента шума F усилителя и входного уровня сигнала таков, что все усилители в системе имеют отношение C/N , равное 59 дБ, то два усилителя будут создавать 56 дБ, 4 усилителя 53 дБ, 8 усилителей 50 дБ, 16 усилителей 47 дБ, 32 усилителя 44 дБ, 64 усилителя 41 дБ. Если выбирать F усилителя и входной уровень так, чтобы каждый усилитель создавал C/N , равное 53 дБ, то 2 усилителя будут создавать 50 дБ, 4 усилителя 47 дБ, 8 усилителей 44 дБ, 16 усилителей 41 дБ. Понятно, что в этих случаях необходимо построить системы различной протяженности. Подобные расчеты нужно делать и для значений СХМ. С помощью этих расчетов можно, регулируя

13.1. Влияние элементов системы на показатели качества передачи

входные и выходные уровни сигналов, спроектировать систему нужной протяженности, не допуская нарушений требований в конечных точках системы.

В этом примере, демонстрирующем накопление шума и интермодуляции в системе, рассматривался только один кабельный маршрут, который, кроме того, включал усилители только одного типа. В реальных системах нет привязки к одному типу усилителей или к одному входному и выходному уровню сигнала, поэтому можем распределить весь шум и интермодуляцию по кабельной сети так, как необходимо. Единственное условие состоит в том, что в любом случае должны быть соблюдены конечные характеристики системы.

Далее будем рассматривать такие варианты проектов, в которых шум и интермодуляция распределены по системе разными способами и каждый способ наилучшим образом подходит к конкретным заданным требованиям. Приведем один пример такого распределения. Предположим, что каскад состоит из 30 усилителей. В спецификации кабельной сети даны следующие характеристики: $C/N = 43$ дБ, $CXM = 53$ дБ. Если каждый усилитель имеет F , равный 9 дБ, и входные рабочие уровни на всех усилителях равны +8 дБ·мВ, то конечную характеристику C/N можно вычислить следующим образом:

$$C/N = S_{вх} + 59 - F - 10 \lg n = 8 + 59 - 9 - 10 \lg 30 = 43,2 \text{ дБ.}$$

Теперь предположим, что имеются 15 усилителей с входными рабочими уровнями +7 дБ·мВ и 15 усилителей с входными рабочими уровнями +9 дБ·мВ. Вычислим показатель C/N в конечной точке системы для этого случая.

При уровне +7 дБ·мВ на входе отношение C/N отдельного усилителя будет равно:

$$C/N = S_{вх} + 59 - F = 7 + 59 - 9 = 57 \text{ дБ.}$$

Тогда отношение C/N каскада из 15 блоков составит:

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg n = 57 - 10 \lg 15 = 45,2 \text{ дБ.}$$

При уровне +9 дБ·мВ на входе отношение C/N отдельного усилителя будет равно:

$$C/N = S_{вх} + 59 - F = 9 + 59 - 9 = 59 \text{ дБ.}$$

Тогда отношение C/N каскада из 15 блоков составит:

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg n = 59 - 10 \lg 15 = 47,2 \text{ дБ.}$$

Комбинирование полученных двух отношений (45,2 дБ и 47,2 дБ) дает общее значение C/N , равное 43 дБ. Этот результат очень близок к предыдущему результату расчета (43,2 дБ) для случая с одинаковыми входными уровнями на всех усилителях. Таким образом, во втором случае перераспределяется шум каскада из 30 усилителей между его частями, почти не изменив общее значение шума каскада. Подобное перераспределение можно сделать и для интермодуляции, но только путем регулирования выходных уровней. Этот пример, хотя и не имеет практической направленности, наглядно демонстрирует имеющуюся у разработчика свободу действий в выборе характеристик усилителей.

13.2. Расчет уровней сигналов в каскаде усилителей

Определим допустимые (минимальные и максимальные) рабочие уровни для магистральных и домовых широкополосных усилителей, при которых обес-

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

печиваются приемлемые показатели качества на выходе абонентской розетки. При этом воспользуемся требованиями, которые были сформулированы ранее. В предыдущем параграфе отмечено, что существует два фактора, ограничивающих рабочий уровень сигнала в системе и тем самым ее емкость и область действия. Первым фактором является число усилителей в магистральном каскаде распределительной сети, а вторым – число транслируемых в ней каналов. В гл. 5 и 6 уже были установлены зависимости показателей качества передачи от рабочего уровня для отдельного усилителя и зависимости показателей качества передачи от количества усилителей в каскаде. Теперь попробуем связать эти зависимости, чтобы установить зависимость рабочего уровня от количества усилителей в каскаде и, кроме того, при трансляции различного числа каналов.

Уровни сигналов в распределительной сети должны обеспечить требуемое стандартом качество передачи телевизионного сигнала на выходе любой абонентской розетки. В системах, передающих более 10 каналов, главными критериями качества согласно стандарту EN-50083 являются отношение несущей к шуму C/N и отношение несущей к помехам комбинационных частот третьего порядка СТВ. Минимальные допустимые значения этих показателей на выходе абонентской розетки составляют 43 дБ для шума и 54 дБ для СТВ. При фиксированном усилении усилителя увеличение уровня сигнала на входе усилителей, приводит к увеличению отношения сигнала к шуму и к увеличению помех комбинационных частот. Сформулируем основные правила расчета шума и интермодуляции в усилительных каскадах коаксиальных кабельных систем.

1. Значения C/N и CSO системы изменяется на 1 дБ при изменении входных уровней сигналов на 1 дБ на всех усилителях.

2. Результат комбинирования двух равных отношений C/N и CSO меньше каждого комбинируемого на 3 дБ.

3. Удвоение числа одинаковых усилителей в каскаде ухудшает общие значения C/N и CSO на 3 дБ.

4. Значения CXM и СТВ системы изменяется на 2 дБ при изменении выходных уровней сигналов на 1 дБ на всех усилителях.

5. Результат комбинирования двух равных значений CXM и СТВ меньше каждого комбинируемого на 6 дБ.

6. Удвоение числа одинаковых усилителей в каскаде ухудшает общие значения CXM и СТВ на 6 дБ.

Эти законы уже были установлены ранее в гл. 5 и 6 в аналитическом виде. Напомним, что для отдельного усилителя были установлены следующие зависимости выходных показателей от выходного уровня сигнала (рис. 13.3):

$$C/N = S - S_{ш0} - K - F;$$

$$СТВ = СТВ_0 + 2(S_{0СТВ} - S);$$

$$CSO = CSO_0 + (S_{0CSO} - S);$$

$$CXM = CXM_0 + 2(S_{0CXM} - S),$$

где S – рабочий уровень выходного сигнала, $S_{0(C)}$ – максимальные выходные уровни при показателях искажений 60 дБ, $S_{ш0}$ – минимальный пороговый шум, $СТВ_0 = 60$ дБ, $CSO_0 = 60$ дБ, $CXM_0 = 60$ дБ.

13.2. Расчет уровней сигналов в каскаде усилителей

Для каскада усилителей были установлены следующие зависимости выходных показателей каскада от количества усилителей (для простоты усилители принимаются одинаковыми):

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg n,$$

$$CTB_{\Sigma} = CTB - 20 \lg n,$$

$$CSO_{\Sigma} = CSO - 10 \lg n,$$

$$CXM_{\Sigma} = CXM - 20 \lg n,$$

где n – количество одинаковых усилителей в каскаде.

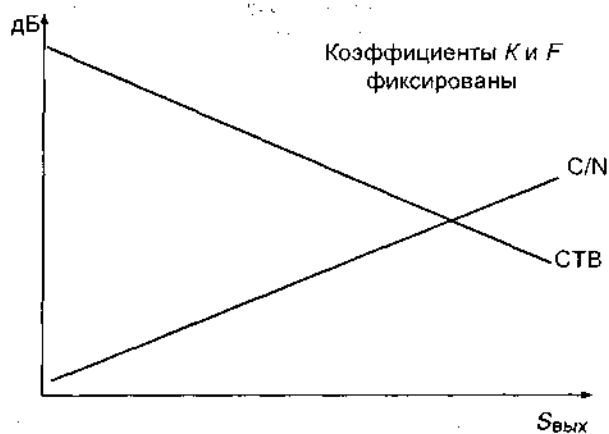


Рис. 13.3. Шум и искажения от выходного уровня усилителя

Выразим рабочий уровень выходного сигнала отдельного усилителя через его показатели качества:

$$S = C/N + S_{ш0} + F + K,$$

$$S = S_{0CTB} - \frac{CTB - CTB_0}{2},$$

$$S = S_{0CSO} - (CSO - CSO_0),$$

$$S = S_{0CXM} - \frac{CXM - CXM_0}{2},$$

где C/N , CTB , CSO и CXM – показатели отдельного усилителя.

Поскольку с ростом выходного уровня уровень искажений растет (показатели IMD и XMD падают), справедливо и обратное, а именно, с увеличением количества усилителей падает допустимый рабочий уровень выходного сигнала. С учетом зависимостей показателей качества и шума от числа усилителей в каскаде, получаем, что выходной рабочий уровень сигнала в каскаде определяется следующими выражениями:

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

$$S \leq C/N_{\Sigma} + S_{\text{ш0}} + F + K + 10 \lg n,$$

$$S \leq S_{0\text{CTB}} - \frac{\text{CTB}_{\Sigma} - \text{CTB}_0}{2} - 10 \lg n;$$

$$S \leq S_{0\text{CSO}} - (\text{CSO}_{\Sigma} - \text{CSO}_0) - 10 \lg n;$$

$$S \leq S_{0\text{СХМ}} - \frac{\text{СХМ}_{\Sigma} - \text{СХМ}_0}{2} - 10 \lg n,$$

где n – количество одинаковых усилителей в каскаде; C/N_{Σ} , CTB_{Σ} , CSO_{Σ} и СХМ_{Σ} – показатели каскада усилителей.

Если в магистральном каскаде используются усилители разных типов, то вместо n в эти формулы необходимо подставить эквивалентное количество усилителей $n_{\text{ЭКВ}}$, вычисляемое следующим образом:

$$n_{\text{ЭКВ}} = \sum_i n_i 10^{0,1\Delta S},$$

где n_i – количество усилителей i -го типа; ΔS – максимальная разность выходных уровней используемых усилителей. Однако, рекомендуется использовать однотипные усилители.

Вторым фактором является количество транслируемых каналов. В спецификации усилителя его показатели качества приводятся для определенного числа каналов. Если зависимость искажений (или максимальных выходных уровней) от числа каналов не задана производителем явно в виде набора значений CTB , CSO и СХМ (или выходных уровней) для разного числа каналов есть, то можно использовать приближительные эмпирические формулы, получаемые из условия сохранения суммарной мощности сигнала, приходящейся на усилитель, при передаче M каналов:

$$S_{(M)} = S - 10 \lg(M/m),$$

$$S_{(M)} = S - 5 \lg(M/m),$$

$$S_{(M)} = S - 10 \lg(M/m),$$

где m – определенное в спецификации число каналов; M – требуемое число каналов; S – рабочий уровень выходного сигнала при m транслируемых каналах (заданный), $S_{(M)}$ – рабочий уровень выходного сигнала при M каналах.

Т.е., если число транслируемых каналов M будет больше, чем заданное ($M > m$), то выходной рабочий уровень уменьшится (показатели интермодуляции ухудшатся) на величину для CTB и CSO на величины $10 \lg(M/m)$ и $5 \lg(M/m)$ соответственно. Если число транслируемых каналов меньше заданного ($M < m$), то показатели интермодуляции улучшатся и выходной рабочий уровень можно будет увеличить на те же величины. Если же усилитель эксплуатируется при том числе каналов, для которого в документации указаны показатели искажений ($M = m$), то выходной уровень не изменится ($\lg(M/m)$ равен нулю). Можно объяснить это и по-другому: чтобы при трансляции M каналов обеспечить сохранение прежних значений показателей интермодуляции, необходимо макси-

13.2. Расчет уровней сигналов в каскаде усилителей

минимальный выходной уровень S_{0CTB} снизить на величину $10\lg(M/m)$, а максимальный выходной уровень S_{0CSO} снизить на величину $5\lg(M/m)$. В силу этого при изучении технической документации на усилители следует обратить внимание на заявляемые значения выходного уровня для разного количества каналов при одном и том же уровне искажений ($CTB_0 = 60$ дБ). Например, разница между выходными уровнями для 2 каналов и для 42 каналов составляет около 13 дБ. Если эта разница выше или ниже указанного значения следует осторожно подходить к заявленным в документации значениям.

Итоговые выражения рабочих выходных уровней каждого усилителя в каскаде из n усилителей при трансляции M каналов будут иметь следующий вид:

$$S \leq S_{0CTB} - \frac{CTB_{\Sigma} - CTB_0}{2} - 10\lg n - 10\lg(M/m);$$

$$S \leq S_{0CSO} - (CSO_{\Sigma} - CSO_0) - 10\lg n - 5\lg(M/m);$$

$$S \leq S_{0СХМ} - \frac{СХМ_{\Sigma} - СХМ_0}{2} - 10\lg n - 10\lg(M/m),$$

где CTB_{Σ} , CSO_{Σ} и $СХМ_{\Sigma}$ – требуемые или рассчитанные на этапе проектирования показатели нелинейных искажений каскада. Разумеется, выбирать нужно минимальный уровень, полученный из этих выражений.

Таким образом, при передаче M каналов в каскаде из n усилителей выходной максимальный уровень каждого усилителя S_0 , заявленный в спецификации, должен быть снижен, по крайней мере, на величину ΔS_{CTB} по искажениям третьего порядка, на величину ΔS_{CSO} по искажениям второго порядка или на величину ΔS_{CTB} по кроссмодуляции:

$$\Delta S_{CTB} \geq \frac{CTB_{\Sigma} - CTB_0}{2} + 10\lg n + 10\lg(M/m);$$

$$\Delta S_{CSO} \geq CSO_{\Sigma} - CSO_0 + 10\lg n + 5\lg(M/m);$$

$$\Delta S_{0СХМ} \geq \frac{СХМ_{\Sigma} - СХМ_0}{2} + 10\lg n + 10\lg(M/m).$$

Эти формулы отражают зависимости, показанные на рис. 13.2. Условие “больше или равно” означает, что при проектировании каскада выходной уровень следует принимать меньше рассчитанной величины, примерно на 1,5 – 2 дБ для учета средней неравномерности АЧХ усилителей и наклона АЧХ тракта передачи между верхней и нижней частотами полосы.

Определим теперь минимальный уровень сигнала на входе усилителя в каскаде. Минимальный входной уровень $S_{вх}$ определяется шумовыми характеристиками самого усилителя и требованиями к величине шума в оконечной точке системы:

$$S_{вх} = C/N + S_{0ш} + 10\lg(n \cdot 10^{0,1F} + T_y),$$

где C/N – требуемый показатель шума на выходе абонентской розетки; $S_{0ш}$ – пороговый тепловой шум (2,4 дБ·мкВ или –58 дБ·мВ); n – количество усилителей в каскаде; F – коэффициент шума усилителя, T_y – относительная шумовая температура усилителя.

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

Коэффициент шума современных магистральных усилителей может быть около 6 – 9 дБ, для домовых усилителей он может варьироваться в пределах 8 – 14 дБ. Относительная шумовая температура усилителя $T_y \leq 50$. Максимально допустимое значение выходного уровня домового усилителя, как правило, больше выходного уровня напряжения магистрального усилителя.

Вспомнив формулу для C/N , можно выразить минимальный входной уровень усилителя через его максимальный выходной уровень:

$$S_{вх} = S_{вых} - K - F + 10 \lg(n \cdot 10^{0,1F} + T_y),$$

где $S_{вх}$ – минимальный входной уровень; $S_{вых}$ – максимальный выходной уровень; K – коэффициент усиления; F – коэффициент шума; n – количество усилителей в каскаде.

Посмотрим теперь, как соотносятся между собой величины потерь, усиления, интермодуляции и шума. Предположим, что система начинается в точке А и передает сигналы до другой (оконечной) точки, которую будем называть точкой В. Расстояние от точки А до точки В будем считать переменной величиной, чтобы исследовать влияние различных значений усиления и уровня сигнала на возможную протяженность системы.

Рассмотрим несколько примеров, в каждом из которых будем полагать, что верхнее значение частоты равно 860 МГц, а потери в кабеле равны 3,2 дБ на 100 м ($\Delta S_d = 0,032$ дБ/м). Само это значение для нас здесь несущественно, важно только, что оно постоянно для всех кабельных участков. Предположим, что имеется некоторый усилитель со следующей спецификацией.

Полоса передачи	45 – 860 МГц
Входной рабочий уровень сигнала $S_{вх}$	+10 дБ·мВ
Выходной рабочий уровень сигнала $S_{вых}$	+31 дБ·мВ
Усиление	21 дБ
Кроссмодуляция СХМ	78 дБ
Интермодуляция третьего порядка СТВ	80 дБ
Интермодуляция второго порядка CSO	83 дБ
Биения третьего порядка	105 дБ
Коэффициент шума F	9 дБ

Отметим, что входной и выходной уровень задаются для определенной частоты сигнала. Сравним характеристики системы (ее показатели интермодуляции и отношение несущая/шум) при уровнях входного сигнала +10 дБ·мВ и +12 дБ·мВ. При постоянном усилении 21 дБ выходные уровни сигналов будут равны соответственно +31 дБ·мВ и +33 дБ·мВ.

Показатель C/N при входном уровне +10 дБ·мВ:

– для одного усилителя

$$C/N = S_{вх} + 59 - F = +10 \text{ дБ·мВ} + 59 \text{ дБ·мВ} - 9 \text{ дБ} = 60 \text{ дБ};$$

– для каскада из 20 усилителей

$$C/N_z = C/N - 10 \lg n = 60 - 10 \lg 20 = 47 \text{ дБ}.$$

Показатель C/N при входном уровне +12 дБ·мВ:

– для одного усилителя

$$C/N = S_{вх} + 59 - F = +12 \text{ дБ·мВ} + 59 \text{ дБ·мВ} - 9 \text{ дБ} = 62 \text{ дБ}.$$

13.2. Расчет уровней сигналов в каскаде усилителей

– для каскада из 20 усилителей:

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg n = 62 - 10 \lg 20 = 49 \text{ дБ.}$$

Определим искажения СТВ для каждого входного уровня. Входному уровню +10 дБ·мВ соответствует выходной уровень +31 дБ·мВ. В спецификации определено, что СТВ составляет 80 дБ при выходном уровне +31 дБ·мВ. Входному уровню +12 дБ·мВ соответствует выходной уровень +33 дБ·мВ. Это на 2 дБ выше уровня определенного производителем, поэтому СТВ в этом случае будет на 4 дБ хуже, чем определенное в спецификации, т.е. 76 дБ. Тогда получим следующие значения для каскада из 20 усилителей.

Интермодуляция каскада при выходном уровне +31 дБ·мВ

$$СТВ_{\Sigma} = СТВ - 20 \lg n = 80 \text{ дБ} - 20 \lg 20 = 54 \text{ дБ.}$$

Интермодуляция каскада при выходном уровне +33 дБ·мВ

$$СТВ_{\Sigma} = СТВ - 20 \lg n = 76 \text{ дБ} - 20 \lg 20 = 50 \text{ дБ.}$$

Сравнительная характеристика системы для двух рабочих уровней сигнала дана в табл. 13.3.

Таблица 13.3

Сравнение результатов расчета

Входной уровень	Выходной уровень	C/N системы	СТВ системы
+10 дБ·мВ	+31 дБ·мВ	47 дБ	54 дБ
+12 дБ·мВ	+33 дБ·мВ	49 дБ	50 дБ

Как и ожидалось, увеличение входного уровня на 2 дБ улучшает значение C/N на 2 дБ, а увеличение выходного уровня на 2 дБ ухудшает СТВ на 4 дБ. Поскольку в обоих случаях используется одно значение усиления (21 дБ) и значение потерь в кабеле постоянно (используется один и тот же кабель), то примерно одинаковыми будут и длины кабельных участков.

Как уже известно, изменение рабочих уровней сигналов влияет на характеристики в конечных точках системы и, если необходимо, можно выбрать уровни так, чтобы получить приемлемое значение шума и интермодуляции. Но есть одно важное обстоятельство, которое здесь нельзя не отметить, а именно: даже имея возможность управлять уровнями сигналов, невозможно повысить экономичность системы, потому что значение усиления выбранного усилителя неизменно. В обоих случаях использовались усилители с усилением 21 дБ. Если бы применялись усилители с лучшими показателями шума и интермодуляции при том же усилении, то это привело бы к увеличению стоимости системы. Для улучшения экономических показателей системы можно было бы только уменьшить необходимое количество усилителей либо за счет использования усилителей с более высоким усилением, либо за счет применения дорогостоящего кабеля с меньшими потерями. Однако, если по каким-либо причинам в реальной просчитанной ситуации допускается ослабить требования к рабочим характеристикам системы передачи в ее конечных точках, то рабочие уровни можно будет повысить или понизить в некоторых точках системы для повышения ее экономичности. Поясним, что имеется в виду.

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

Допустим, что требованиями к системе передачи установлено значение 42 дБ для C/N и значение 52 дБ для СТВ в оконечных точках. Используя усилители и отрезки кабеля с одинаковыми характеристиками, попытаемся установить, как влияют рабочие уровни сигнала на протяженность системы или ее область охвата. Допустим также, что при входном уровне +10 дБ·мВ и выходном уровне +31 дБ·мВ (или, коротко, +10/+31 дБ·мВ) каждый усилитель имеет показатели $C/N = 60$ дБ и СТВ = 80 дБ. Обе эти характеристики гораздо лучше требуемых в оконечных точках системы. При данном C/N можно было бы построить каскад из 50 усилителей, прежде чем C/N системы ухудшится до значения 42 дБ, указанного в спецификации. Однако, СТВ такого каскада составит 46 дБ, что не соответствует требованиям к системе, где допустимый СТВ задан равным 52 дБ.

Если использовать одинаковые усилители с усилением 21 дБ, то при уровнях сигнала +8,5 дБ·мВ на входе и +29,5 дБ·мВ на выходе, теоретически можно построить каскад из 35 усилителей, соблюдая при этом требования к системе как по значению C/N , так и по значению СТВ. Проверим это с помощью расчетов. Поскольку при входном уровне +10 дБ·мВ предполагалось $C/N = 60$ дБ, то при входном уровне +8,5 дБ·мВ получим $C/N = 58,5$ дБ. Тогда C/N каскада будет равно:

$$C/N_{\Sigma} = C/N - 10 \lg N = 58,5 - 10 \lg 35 = 43 \text{ дБ.}$$

Поскольку при выходном уровне +31 дБ·мВ СТВ усилителя был равен 80 дБ, то при выходном уровне +29,5 дБ·мВ СТВ усилителя будет составлять 83 дБ. Тогда СТВ каскада будет, равно

$$СТВ_{\Sigma} = СТВ - 20 \lg N = 83 \text{ дБ} - 20 \lg 35 = 52 \text{ дБ.}$$

Таким образом, работая с уровнями сигнала, отличными от тех, которые даны производителем в спецификации, можем увеличивать протяженность системы (т.е. число усилителей в каскаде) до тех пор, пока выполняются требования для оконечных точек системы. Это значит, что если эти требования относятся только к сделанному нами в начале предположению о передаче сигналов между двумя точками, то можно расширять систему просто регулируя уровни сигналов в этих точках. При этом не потребуются менять оборудование или кабель на более дорогой. При проведении расчетов магистральных усилителей корректировку выходного уровня делают, где это возможно, только в сторону понижения или сохраняют неизменным.

13.3. Оптимальное усиление усилителя

До сих пор рассматривалась ситуация, когда усилитель уже выбран, т.е. усиление неизменно, поэтому на показатели качества передачи можно было влиять только путем изменения выходного уровня. Само по себе значение усиления не накладывало ограничений на рабочие уровни. Можно, например, работать с усилителем 22 дБ, который при входном уровне +10 дБ·мВ создает уровень +32 дБ·мВ на выходе. Можно работать с тем же усилителем, создающим при входном уровне +12 дБ·мВ уровень +34 дБ·мВ на выходе, хотя показатели шума и интермодуляции, конечно, будут разными для этих двух случаев.

Однако, в первую очередь перед разработчиком встает вопрос выбора усилителя. Отталкиваясь при этом приходится от величины усиления. Найдя уси-

13.3. Оптимальное усиление усилителя

ление усилителя, можно определить и требуемое количество усилителей в кабельной системе, поскольку эти величины связаны простой зависимостью через суммарные потери на магистрали, складывающиеся из потерь в кабеле и во всех пассивных приборах. Суммарные потери на магистрали должны быть компенсированы суммарным усилением каскада усилителей:

$$L_{\Sigma} = nK,$$

где n – количество одинаковых усилителей в магистральном каскаде; K – коэффициент усиления усилителя; L_{Σ} – суммарные потери в магистрали.

При этом считается, что все усилители в магистрали идентичны, т.е. имеют одинаковые коэффициенты усиления K и шума F . Использование разных усилителей, хотя и возможно, но не рекомендуется, поскольку при этом ухудшается стабильность и предсказуемость работы системы, а также усложняются проектные расчеты.

Для решения этой задачи нужно рассмотреть влияние величины усиления на качество передачи. Теперь уровень выходного сигнала будем считать фиксированным. Ограничения на усиление обнаруживаются, когда расширяется полоса передачи или (и) увеличивается протяженность магистрали, и, соответственно, растут уровни шумов и искажений по отношению к уровню полезного сигнала. Напомним, что отношение сигнала к шуму на выходе усилителя называется приведенным динамическим диапазоном. Приведенный динамический диапазон, учитывающий одновременно и шум и усиление, является основным качественным показателем усилителя. Увеличение протяженности магистрали или расширение полосы частот (увеличение числа каналов) требует применения магистральных усилителей с повышенным приведенным динамическим диапазоном при заданном уровне выходного сигнала. И здесь есть несколько путей. Первый путь – уменьшить усиление усилителей, оставив прежним значение коэффициента шума. Выбор усилителей с меньшим коэффициентом усиления позволяет повысить итоговое отношение сигнал/искажение в магистральном каскаде, но, в то же время, чтобы полностью компенсировать потери на магистрали, придется увеличить число усилителей в каскаде (протяженность каждого усилительного участка при этом уменьшится), следовательно, шумы возрастут. Второй путь – уменьшить коэффициент шума усилителей, сохранив прежнее усиление. При этом в более длинном каскаде можно будет повысить общее отношение сигнал/шум в магистрали, но возрастут искажения. В обоих вариантах сталкиваемся с ограничением на возможную длину магистрали – либо из-за роста шума, либо по причине роста искажений. С точки зрения снижения и шумов, и искажений, накопленных в магистрали, наилучшим решением является одновременное уменьшение коэффициента усиления и коэффициента шума усилителей. Использование такого решения позволит достичь максимальной протяженности магистрального каскада, однако, это потребует использования большого числа дорогих усилителей и повлечет значительный рост стоимости проекта. Нерациональное увеличение числа качественных магистральных усилителей приводит к неоправданно завышенным затратам, поэтому выбор усилителей с низким коэффициентом шума и низким коэффициентом усиления явно не оптимален. Нужно иметь в виду, что одновременное изменение коэффициентов шума и усиления не даст результатов в плане расширения емкости кабельной системы, если при этом приведенный динамический диапазон будет оставаться постоянным. Например, если уменьшать ко-

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

эффицент шума и на столько же децибел увеличивать коэффициент усиления, то удлинить магистраль не удастся, так как выигрыш по шуму будет поглощен ростом искажений.

Рассматривать уменьшение протяженности магистрали при расширении полосы передачи как способ решения не имеет смысла, поскольку разработчик обычно исходит из того, что размеры области обслуживания известны и, следовательно, протяженность магистрали и суммарные потери в ней фиксированы. Вместо этого можно увеличить количество головных станций в системе, но это опять таки ведет к росту стоимости проекта.

Таким образом, выбор усилителя базируется на балансировании соотношения “цена-качество”, что приводит либо к необходимости выбора дорогих усилителей с широким приведенным динамическим диапазоном, либо к необходимости выбора менее качественных и менее дорогих усилителей с пониженным диапазоном. Произвольный выбор усилителей средней стоимости означает, что по одному из качественных показателей будем иметь ограничение на протяженность магистрали, но, в то же время, по другому показателю усилитель будет использоваться не эффективно.

В этих противоречивых условиях целью разработчика является выбор оптимальной величины коэффициента усиления (или оптимального числа усилителей) на основе компромисса между искажениями и шумовыми характеристиками. На рис. 13.2,а показаны две зависимости – отношения сигнал/шум и величины искажений от числа усилителей в каскаде. На первой зависимости отмечена точка (C/N_2) , в которой сигнал/шум становится предельно низким. Число усилителей в каскаде в этой точке равно n_1 . Левее этой точки (в сторону уменьшения числа усилителей) при некотором фиксированном усилении находится область, в которой ресурсы усилителей по шуму еще не израсходованы полностью, и протяженность каскада можно увеличить. Правее этой точки располагается область, где шум усилителя становится выше допустимого и дальнейшее увеличение числа усилителей в каскаде невозможно. Это видно и по рис. 13.2,б, где показана допустимая протяженность каскада. Чтобы увеличить n_1 следует уменьшить наклон зависимости $C/N(n)$, т.е. уменьшить коэффициент шума усилителей. Аналогичную предельную точку $(-CTB_2)$ имеет зависимость величины искажений от числа усилителей. Соответствующее ей число усилителей в каскаде равно n_2 . Левее точки n_2 усилители имеют запас по искажениям, а правее этой точки искажения становятся недопустимо высокими. Чтобы увеличить n_2 , нужно уменьшить наклон зависимости, т.е. уменьшить коэффициент усиления усилителей. Усиление будет оптимальным, если предельное количество усилителей по показателю шума совпадает с предельным количеством усилителей по показателю искажений, т.е. точка n_1 совпадает с точкой n_2 . Иначе говоря, оптимальное число усилителей в каскаде $n_{\text{опт}}$ находится следующим образом:

$$n_{\text{опт}} = n_1 = n_2.$$

Попробуем получить эту точку оптимального усиления аналитически. Для этого необходимо выразить выходной уровень усилителя через показатель C/N и показатель нелинейных искажений в реальных условиях эксплуатации усилителя, т.е. в каскаде из n блоков при трансляции M каналов. Покажем порядок расчета, для CTB (для других показателей нелинейных искажений расчет аналогичен). Для этого воспользуемся формулами, полученными в предыдущем

13.3. Оптимальное усиление усилителя

параграфе. Допустимый выходной уровень по шуму каскада усилителей выражается следующей формулой:

$$S \leq C/N_{\Sigma} + S_{\text{ш0}} + F + K + 10\lg(L_{\Sigma}/K),$$

где S – выходной уровень усилителя; C/N_{Σ} – выходное отношение сигнал/шум каскада; $S_{\text{ш0}}$ – пороговый шум усилителя; F – коэффициент шума; K – коэффициент усиления; L_{Σ} – суммарные потери в магистральном каскаде.

С другой стороны, допустимый выходной уровень по величине интермодуляции третьего порядка, которая растет быстрее других видов искажений, для каскада усилителей ограничивается значением:

$$S \leq S_{\text{оств}} - \frac{\text{СТВ}_{\Sigma} - \text{СТВ}_0}{2} - 10\lg(L_{\Sigma}/K) - 10\lg(M/m),$$

где S – выходной уровень усилителя, СТВ_{Σ} – выходной показатель интермодуляции каскада; $S_{\text{оств}}$ и СТВ_0 – заданные в спецификации значения; K – коэффициент усиления; L_{Σ} – суммарные потери в каскаде, m – заданное в спецификации число каналов; M – число транслируемых каналов.

Если сопоставить последние два неравенства, получится следующее выражение:

$$S_{\text{оств}} - \frac{\text{СТВ}_{\Sigma} - \text{СТВ}_0}{2} - C/N_{\Sigma} - S_{\text{ш0}} - F - K - 20\lg(L_{\Sigma}/K) - 10\lg(M/m) = 0.$$

Последнее выражение связывает показатели шума и интермодуляции каскада с коэффициентом усиления усилителя. Подставив в него заданные или рассчитанные для конечной точки каскада величины C/N_{Σ} , СТВ_{Σ} , и решив полученное уравнение относительно K , получим искомую оптимальную величину усиления. Аналитическое решение этого уравнения затруднено, но оно легко решается графически или в табличном виде путем подстановки значений K . Например, при $S_{\text{оств}} = 120$ дБ·мкВ, $\text{СТВ}_{\Sigma} = 80$ дБ, $\text{СТВ}_0 = 60$ дБ, $C/N_{\Sigma} = 43$ дБ, $F = 9$ дБ, $L_{\Sigma} = 400$ дБ, $m = 30$ при трансляции 50 каналов оптимальное значение K оказывается равным около 32 дБ, а оптимальное число усилителей, следовательно, равно 13. На основании этого уравнения можно построить зависимость любого показателя качества передачи (C/N_{Σ} или СТВ_{Σ}) или суммарных потерь в магистрали, или числа каналов от K при фиксированных остальных показателях. Графики зависимостей $C/N_{\Sigma}(K)$ и $\text{СТВ}_{\Sigma}(K)$ для $S_{\text{оств}} = 120$ дБ·мкВ, $\text{СТВ}_{\Sigma} = 80$ дБ, $\text{СТВ}_0 = 60$ дБ, $C/N_{\Sigma} = 43$ дБ, $F = 9$ дБ, $L_{\Sigma} = 400$ дБ, $m = 30$, $M = 50$ показаны на рис. 13.4.

Исследуя функции $C/N_{\Sigma}(K)$ и $\text{СТВ}_{\Sigma}(K)$ на экстремум, можно находить оптимальное значение не только для коэффициента K , но и для других качественных параметров усилителя. Параметрами усилителя в уравнении являются величины $S_{\text{оств}}$, F и K . Все вместе они определяют тип усилителя, следовательно, задав любые два из них можно найти третий и сделать, таким образом, обоснованный выбор усилителя.

Исследование показывает, что для обеспечения в магистрали $C/N_{\Sigma} = 45$ дБ при тех же остальных параметрах оптимальное усиление должно составлять около 29 дБ, и в этом случае потребуется уже 14 усилителей. Для обеспечения в магистрали $\text{СТВ}_{\Sigma} = 87$ дБ при тех же прочих параметрах оптимальное усиление должно составлять около 26 дБ, и это потребует включения 16 усилителей

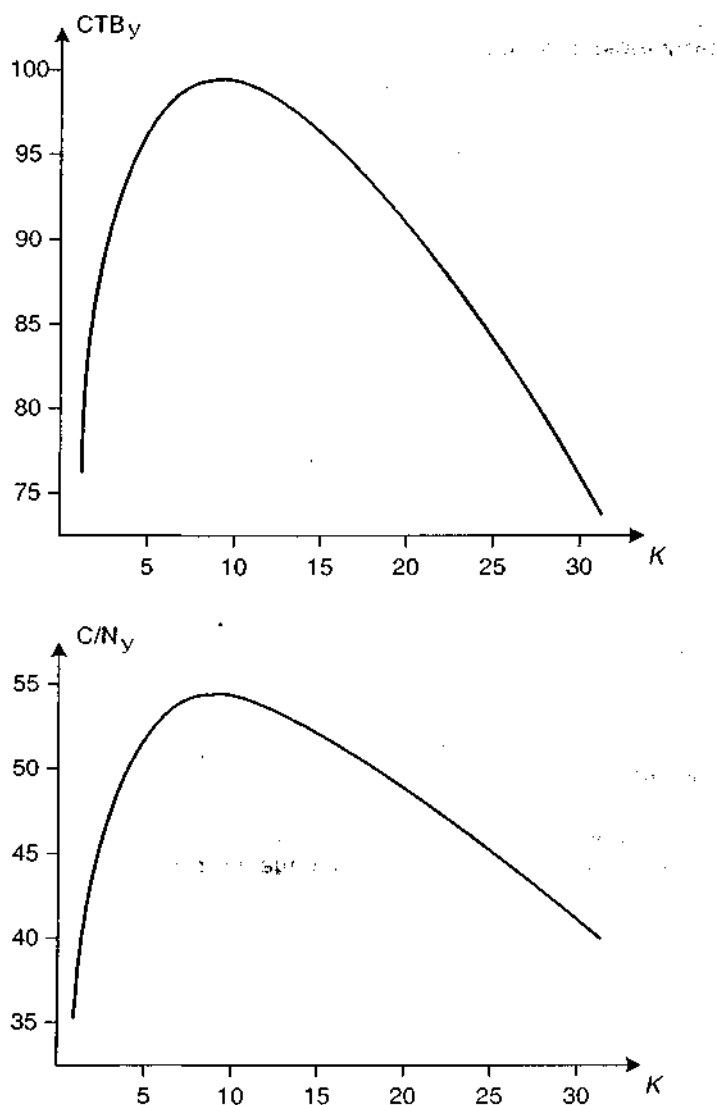


Рис. 13.4. Исследование функций $C/N_{\Sigma}(K)$ и $CTB_{\Sigma}(K)$ на экстремум

в каскаде. Для обеспечения в магистрали $CTB_{\Sigma} = 57$ дБ, $C/N_{\Sigma} = 45$ дБ и $F = 11$ дБ при тех же прочих параметрах оптимальное усиление должно составлять около 40 дБ, и это потребует включения всего 10 усилителей в каскаде. Аналогичным образом можно исследовать зависимости $C/N_{\Sigma}(n)$ и $CTB_{\Sigma}(n)$ от числа усилителей при выбранном фиксированном усилении. На рис. 13.5 показан пример расчета оптимального коэффициента усиления.

Вопрос выбора тех или других усилителей не всегда решается однозначно. Эффект от использования усилителей определенного типа нужно оценивать комплексно, сразу по нескольким показателям, среди которых протяженность системы, количество блоков, стоимость строительства, и качество обслуживания.

13.3. Оптимальное усиление усилителя

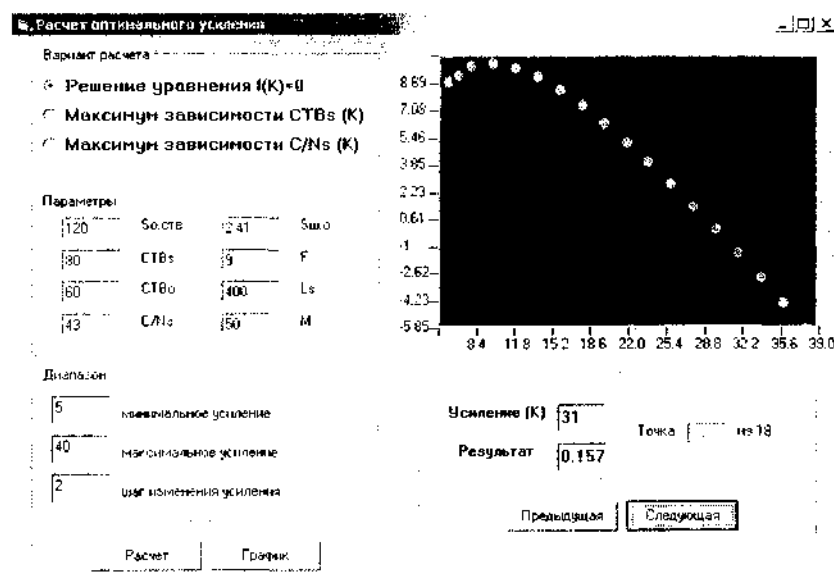


Рис. 13.5. Расчет коэффициента усиления

Чтобы сделать выбор правильный необходимо принимать во внимание соотношение между усилением, шумом, интермодуляцией и рабочими уровнями сигналов. Подводя предварительный итог, можно сформулировать несколько выводов, которыми можно руководствоваться. Во-первых, рабочие уровни можно регулировать и это не сказывается на стоимости системы. Можно расширить область обслуживания системы соответствующим подбором рабочих уровней, но эквивалентная стоимость проекта в целом от этого не уменьшится. Во-вторых, используя усилители с более высоким усилением, можно получить некоторый экономический эффект, так как в этом случае должны будем получить требуемые показатели системы при той же длине кабеля с помощью меньшего количества блоков. Но увеличение усиления дает не только положительный эффект. Более высокое усиление влечет за собой возрастание шума или накопление интермодуляционных искажений в системе или то и другое вместе. В-третьих, каскад из усилителей с меньшим усилением будет длиннее (не по протяженности системы, а по числу усилителей) и обеспечит более высокое качество передачи. В этом случае практически всегда возрастают расходы на первоначальное строительство системы, но экономический выигрыш такого решения проявляется в ходе последующей длительной эксплуатации. Сопутствующим недостатком является очень незначительное увеличение затрат на обслуживание большего числа блоков.

Пример.

Сравним эффект от использования двух различных усилителей, один из которых имеет усиление 22 дБ, а другой 32 дБ. Их спецификации приведены в табл. 13.4. Заметим, что при одном и том же значении кроссмодуляции (57 дБ) выходная характеристика усилителя В хуже. Допустим, что потери в кабеле составляют 0,032 дБ/м, тогда нетрудно подсчитать, что длина усилительного участка в случае использования усилителя А составит 687 м, а в случае использования усилителя В она составит 1000 м.

Сравнение усилителей с разным усилением

Показатель	Усилитель А	Усилитель В
Усиление	22 дБ	32 дБ
Коэффициент шума	10 дБ	10 дБ
Кроссмодуляция	57 дБ	57 дБ
Выходной уровень	+50 дБ·мВ	+48 дБ·мВ

Сравнение эффективности использования этих двух типов усилителей будем проводить с точки зрения их количества и общей протяженности системы, которую они позволяют построить. Система из 25 усилителей А будет иметь протяженность около 17,2 км, что является довольно реалистичным примером. Если использовать усилители В, то система той же протяженности потребует только 17,2 усилителей. Округление до целого количества усилителей следует делать в сторону увеличения, так как иначе необходимое усиление в системе не будет обеспечено и уровень сигнала в окончании каскада окажется ниже требуемого. Следовательно, 17,2 округляется до 18.

Выберем рабочие режимы усилителей (входной уровень/выходной уровень). Допустим, что усилитель А работает с уровнями +11/+33 дБ·мВ, а усилитель В работает с уровнями +6/+38 дБ·мВ. Исходя из этих данных, рассчитаем показатели каждого каскада.

Показатели каскада из 25 усилителей типа А.

$$C/N_{\Sigma} = C/N_y - 10 \lg n = 60 - 10 \lg 25 = 46 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_y - 20 \lg n = 91 - 20 \lg 25 = 63 \text{ дБ}.$$

Показатели каскада из 18 усилителей типа В.

$$C/N_{\Sigma} = C/N_y - 10 \lg n = 55 - 10 \lg 18 = 42,4 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_y - 20 \lg n = 77 - 20 \lg 18 = 52 \text{ дБ}.$$

Из приведенных выражений следует, что при использовании усилителей типа А получаем C/N_{Σ} и $СХМ_{\Sigma}$, которые удовлетворяют требованиям к качеству сигнала в конечных точках системы. При использовании усилителей типа В получаем C/N_{Σ} и $СХМ_{\Sigma}$, которые также согласуются с требованиями к конечным точкам системы, но необходимое количество усилителей при этом уменьшается с 25 до 18. Заметим, что получившиеся показатели системы из усилителей В находятся на границе допустимого, поэтому нельзя расширить систему, используя усилители типа В при тех же рабочих уровнях так, чтобы не выйти при этом за рамки требований к системе. Предельная протяженность такой системы составляет 17,2 км. Система из усилителей А, наоборот, обладает запасом по обоим показателям качества и при необходимости может быть расширена.

По результатам расчетов можно сделать следующий вывод. Хотя по показателю СХМ усилитель В хуже, чем усилитель А, его использование также возможно. Экономический эффект от использования 18 усилителей вместо 25 складывается из понижения потребляемой системой мощности питания, более

долговременных первоначальных инвестиций и более экономичного технического обслуживания, поскольку система из 18 блоков будет надежнее, чем система из 25 блоков.

13.4. Расчет уровней сигналов в абонентской точке

Конечным обслуживаемым прибором в сети КТВ является телевизионный приемник. Для подачи сигнала на телевизоры, находящиеся в отдельных зданиях, система передачи должна обеспечивать соответствующее усиление сигнала и иметь доступ к абонентским точкам посредством домашней кабельной разводки, включающей обычно несколько домашних ветвей (сервисных ответвлений), разводимых из точки включения домашнего усилителя с помощью делителя, и конечных кабельных отрезков, называемых абонентскими кабелями. Все ответвления и кабели домашней разводки представляют собой части одной системы передачи с той же шириной полосы. Абонентские кабели подключаются к домашнему ответвлению с помощью абонентских ответвителей. Для их правильного подключения необходимо сделать первичную оценку уровней сигнала в разных точках домашней ветви и сигналов. Если позднее окажется, что в окончаниях абонентских кабелей необходимые уровни передачи выше первоначально запланированных, то весь проект системы может потребовать довольно значительного пересмотра, поскольку он окажется в этом случае неэкономичным.

Предположим, на вход каждого телевизионного приемника требуется подавать сигнал с уровнем $+3$ дБ·мВ (63 дБ·мкВ). Это значение является в технике КТВ стандартным. Теперь разработчик должен выяснить, сколько телевизионных приемников в среднем будет находиться в доме абонента, чтобы определить необходимый уровень сигнала в ответвлении. Например, если предполагается, что в квартире абонента в среднем два приемника, то уровень сигнала, подаваемого в каждую сервисную точку должен быть выше по крайней мере на $+3,5$ дБ·мВ для возможности разделения сигнала в этой точке, т.е. составлять $+6,5$ дБ·мВ. Кроме того, необходим некоторый допуск на падение уровня сигнала в абонентском кабеле, соединяющем абонентский ответвитель со входом абонентского приемника. Допустим эти потери составляют $0,5$ дБ, тогда для возможности подключения в одной сервисной точке двух приемников уровень сигнала в соответствующей точке домашней ветви должен составлять около $+7$ дБ·мВ. Далее следует предусмотреть потери в кабеле домашней ветви, к которой подключен данный абонент, чтобы определить необходимые уровни на выходе домашнего усилителя. Такой порядок, когда расчет выполняется от конечной абонентской точки, исходя из известного уровня, который должен быть в ней обеспечен, является классической, но на практике часто применяют и обратный порядок расчета, когда расчет ведется от известного уровня на выходе домашнего усилителя. Тогда подключая последовательно, один за другим, абонентские кабели, разработчик проверяет, достаточно ли уровня сигнала для обслуживания очередной абонентской точки. Если уровня недостаточно, разработчик повышает уровень сигнала на выходе домашнего усилителя или устанавливает другие, более короткие, отрезки соединительного кабеля там, где это возможно.

Оптимальный уровень сигнала на выходе абонентской розетки является также и одним из факторов выбора домашнего усилителя. На практике определению уровней на входах ответвлений должно предшествовать обследование

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

обслуживаемой области и измерение длин всех домовых и абонентских ответвлений. Если длины всех ответвлений различны, то было бы неэкономично установить на выходах всех стояковых усилителей уровни, достаточные для подключения самого длинного ответвления, поскольку на подавляющем большинстве абонентских приемников уровни сигнала были бы тогда завышены. Поэтому разработчик рассматривает в качестве наиболее экономически эффективной и оптимальной длину большинства абонентских ответвлений и, исходя из нее, рассчитывает уровень сигнала на входе ответвления, складывая потерь на этой длине кабеля с требуемым уровнем сигнала в абонентской точке. Чтобы изменить в нужную сторону уровни на абонентских ответвлениях всегда можно использовать кабель другой марки, соответственно, с другим значением потерь. Но это решение требует основательного экономического анализа.

Очевидно, оптимальным уровнем сигнала на выходе абонентской розетки является тот уровень, который необходим для качественной работы телевизионного приемника. Величина уровня на входе ТВ приемника (или на выходе абонентской розетки) должна определяться как оптимальная с точки зрения минимального приемлемого качества передачи сигнала на выходе абонентской розетки. Необоснованное завышение уровня сигнала не только не улучшит качество передачи (скорее наоборот), но и повысит требования к выходным характеристикам домовых усилителей, что повлечет увеличение стоимости сети. Тем не менее, иногда разработчик стремится завысить уровень сигнала, доводя его до 90 дБ·мкВ. Часто это происходит и не умышленно, вследствие неправильного распределения уровней сигнала в пределах домовой распределительной сети. Для этого в стандарте EN 50083 специально отмечено, что в целях исключения перегрузки определенных типов телевизионных приемников приведенные значения уровней должны быть уменьшены.

Выходной уровень зависит от количества передаваемых каналов и количества активных устройств на пути сигнала до абонентской точки. В конечной точке системы этот уровень должен соответствовать тем значениям, которые указаны в стандарте систем КТВ. Отечественный ГОСТ Р 52023-2003 предусматривает, что уровни сигналов (по уровню несущей изображения) на выходах абонентских розеток должны находиться в пределах 60 – 80 дБ·мкВ. Это не противоречит требованиям европейского стандарта EN 50083-7 для частотной сетки OIRT с интервалом 8 МГц. Согласно EN 50083-7, при трансляции более 20 каналов максимальный уровень не должен превышать 77 дБ·мкВ. В некоторых случаях в оконечных точках системы допускается не выравнивать линейное искажение спектра передачи, вносимое коаксиальным кабелем. Это возможно, когда максимальное различие в уровнях сигналов на выходе розетки не более 12 дБ во всем диапазоне частот 47 – 862 МГц и не более 6 дБ в любом диапазоне шириной 60 МГц. Попробуем ответить на вопрос, чем определяются эти требования стандартов и установим допустимые границы уровня сигнала.

Минимальный уровень сигнала определяется реальной чувствительностью телевизионного приемника, которая зависит от характеристик ТВ демодулятора. Ее нельзя путать с дугой характеристикой чувствительности ТВ приемника, которая называется чувствительностью, ограниченной усилением. Эта характеристика обеспечивается практически всеми современными телевизорами с большим запасом, что достигается увеличением коэффициента усиления до требуемого значения. Реальная чувствительность учитывает влияние собственных шумов приемника и определяется минимальным уровнем полезного

сигнала при заданном отношении сигнал/шум или сигнал/помеха уже демодулированного сигнала. Для минимального (удовлетворительного) качества воспроизведения сигналов цветного ТВ отношение сигнал/шум на входе амплитудного демодулятора должно составлять 26 дБ. Реальной чувствительностью телевизионного приемника, приводимой в его паспортных данных, называют минимальный уровень сигнала, при котором наблюдается такое входное отношение сигнал/шум (26 дБ). Для современных приемников чувствительность составляет не более 40 мкВ (32 дБ-мкВ) в диапазоне 47 – 300 МГц и не более 70 мкВ (37 дБ-мкВ) в диапазоне 470 – 862 МГц. Из этих двух значений выбирается наибольшее 37 дБ-мкВ, чтобы обеспечить технологический запас. Качество телевизионного изображения, которое можно считать идеальным, достигается при входном отношении сигнал/шум 46 дБ, следовательно, минимальный уровень сигнала на входе ТВ приемника должен превысить величину его чувствительности на 20 дБ (46₋₂₆). Таким образом, минимальный входной уровень ТВ приемника должен составлять около 57 дБ-мкВ. Некоторые модели отечественных телевизоров (ниже четвертого поколения) обладают более слабой чувствительностью – около 40 дБ-мкВ в диапазоне 47 – 300 МГц и 43 дБ-мкВ в диапазоне 470 – 862 МГц. Для идеального качества воспроизведения сигнала такими приемниками входное отношение сигнал/шум должно достигать 43 дБ, поэтому их минимальный входной уровень должен составлять 60 дБ-мкВ (43₋₂₆⁺⁴³). Тем самым, получили приведенную выше минимальную границу входного уровня ТВ приемника 57 – 60 дБ-мкВ.

Максимальный уровень входного уровня сигнала ТВ приемника зависит от параметров селектора телевизионных каналов, устанавливаемого на входе телевизора, а именно, от уровня канальной кроссмодуляции между несущей изображения, звука и цвета, а также от уровня диапазонной кроссмодуляции между несущими изображения нескольких ТВ каналов. В частности, канальная кроссмодуляция глубиной в 1% наблюдается при входном уровне полезного сигнала около 80 дБ-мкВ в любом диапазоне. Это значение регламентирует EN-50083 для ТВ приемников в зависимости от избирательности входного контура, диапазона частот и расстановки каналов.

Минимальный и максимальный уровни сигналов устанавливаются на основе усредненных характеристик телевизионных приемников. Учитывая рассчитанные значения минимального и максимального уровней, а также то, что типовые потери в кабеле RG-6 абонентского ответвления длиной не более 50 м на частоте 862 МГц не превышают 10 дБ, получаем, что оптимальный уровень на выходе абонентского ответвителя должен составлять 65 – 70 дБ-мкВ. Если в домашней сети используется предварительное выравнивание в каждом стояке, то обеспечить равномерное распределение уровней сигналов между всеми абонентами будет легче. Однако, в протяженных домашних сетях с большим количеством абонентских точек выровнять сигналы удастся лишь в некоторой небольшой части точек, поэтому выравнивание лучше обеспечивать непосредственно в индивидуальном абонентском отводе с помощью самих ответвителей и делителей, способных выполнять одновременно и функцию эквалайзера, или путем использования индивидуальных аттенюаторов на отдельных абонентских розетках. Наклон спектра сигнала от частоты при таком подходе может регулироваться величиной известного номинального ослабления.

В заключение главы приводятся требования стандарта EN-50083 (часть 7) к уровням радиосигнала на выходе абонентской розетки кабельной распределительной системы.

Глава 13. Уровень сигнала и качество передачи

тельной сети. Эти требования близки к требованиям ГОСТ 52023-2003, приведенным в гл. 1, но более полны. Нормативные значения параметров приведены в табл. 13.5 и 13.6.

В табл. 13.5 приведены (неполностью) максимальные и минимальные уровни несущих радиосигналов в полосе прямого канала на выходах абонентских розеток при передаче более 20 каналов. Максимальные уровни должны быть не более, а минимальные не менее указанных значений. Если на системных розетках, предназначенных для АМ-ТВ, присутствуют FM звуковые сигналы, то уровень любой FM несущей должен быть, по крайней мере, на 3 дБ ниже самого низкого уровня телевизионного сигнала в розетке. В целях исключения перегрузки некоторых типов телевизионных приемников приведенные значения могут быть уменьшены, например, путем использования индивидуальных аттенюаторов. Уровень звуковых несущих берется по отношению к уровню несущей видео, который зависит от стандарта телевизионного вещания и характеристик телевизоров. В табл. 13.6 приводятся максимальные допустимые различия в уровнях несущих на выходе любой абонентской розетки между телевизионными каналами для разных частотных диапазонов.

Таблица 13.5

Уровни несущих на выходе абонентской розетки

Служба вещания	Минимальный уровень, дБ-мкВ	Максимальный уровень, дБ-мкВ
АМ-телевидение:		
– для систем с сеткой 7 МГц	57	77
– для систем с сеткой 8 МГц	60	80
FM-телевидение	47	77
FM-звук моно	40	70
FM-звук стерео	50	70

Таблица 13.6

Допустимые различия в уровнях несущих

Диапазон	Модуляция	Различие уровней, дБ
47 – 862 МГц	АМ	12
Любой 60 МГц диапазон	АМ	6
Смежный канал	АМ	3
950-1750 МГц	FM	15
до 470 МГц	FM	15

Резюме

Накопление шумов и нелинейных искажений в каскаде активных устройств происходит по логарифмическим законам (по закону первой степени для C/N и CSO, по закону второй степени для CXM и CTB). Расчетные зависимости для

13.4. Расчет уровней сигналов в абонентской точке

C/N, CSO, CTB, и CXM, являющиеся основными при проектировании распределительной сети, были приведены в гл. 5 и 6. Исходя из них, выражены выходные уровни каскада от числа транслируемых каналов и числа усилителей в каскаде.

Если разработчик системы может определить конкретные требования к проектируемой системе (протяженность системы, расположение точек подключения абонентских ответвлений), то он может принять наиболее выгодное решение исходя из соотношения между усилением и рабочими уровнями сигналов с целью снижения стоимости проекта. Выбранная комбинация этих факторов будет эффективна только для конкретной ситуации. Разработчик системы свободен в выборе вышеназванных факторов только в пределах значений, не нарушающих спецификации в оконечных точках системы передачи. Окончательный выбор рабочих уровней и усиления в системе должен учитывать все структурные элементы системы и возможность последующего ее расширения. Когда окончательный выбор рабочих уровней сигналов и усиления усилителя сделан, разработчик может обратиться к вопросам выравнивания амплитудно-частотной характеристики. Но это ни в коем случае нельзя делать до того, как сделан обоснованный выбор усилителей.

Глава 14

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

В этой главе рассматривается влияние температуры на работоспособность коаксиальной кабельной системы и методы компенсации этого влияния. Изменение температуры приводит к изменению потерь передачи. Система КТВ включает, как правило, несколько километров коаксиальных кабельных участков, поэтому влияние температуры представляет серьезную проблему, если не предпринимаются действия для его устранения или коррекции. Влияние состоит в отклонении рабочих уровней передачи от расчетных значений и, как следствие, изменение показателей шума и нелинейных искажений в оконечных точках системы.

Существуют два режима коррекции рабочих характеристик системы – автоматическая регулировка усиления (АРУ) и автоматическая регулировка наклона (АРН). В обоих режимах используется по сути один и тот же метод коррекции. Оба режима коррекции реализуются в усилительных устройствах коаксиальной кабельной системы. Говорить о влиянии температуры на потери в системе имеет смысл только для магистральных усилительных каскадов, протяженность которых измеряется километрами. Для небольших фидерных каскадов это влияние несущественно, тем более, что домовые фидерные усилители могут устанавливаться внутри дома, где температура относительно стабильна. Хотя действие корректирующих механизмов прежде всего связано с температурными отклонениями, эти же механизмы являются защитой от таких факторов, как старение оборудования, некорректная настройка оборудования обслуживающим персоналом или флуктуации напряжения в источниках питания.

14.1. Зависимость потерь в кабеле от температуры

Характер этой зависимости таков, что при нагревании проводников кабеля потери в нем растут, а при охлаждении потери уменьшаются. Потери в коаксиальном кабеле изменяются на величину не более 0,1 % при изменении температуры на 1 °С. Казалось бы, это немного, но при значительных колебаниях температуры получается сильное изменение потерь. В большинстве регионов России годовой диапазон колебаний температуры от –20 до +30 °С является нормой. Изменение температуры, таким образом, составляет 50 °С. В этих условиях величина отклонения потерь передачи в протяженной кабельной системе со суммарными потерями, например, 1000 дБ при протяженности системы около 30 км будет составлять 100 дБ. Это очень существенное значение (10% от номинальной) и ее, очевидно, нельзя просто проигнорировать, ожидая, что при этом оконечные характеристики передачи в системе останутся удовлетворительными. Практика показывает, что уже при длине кабельной линии 1500 м зависимость изменения потерь от температуры обнаруживается, а в более протяженных системах она становится очевидной.

14.1. Зависимость потерь в кабеле от температуры

В табл. 14.1 показаны потери передачи в магистральном кабеле серии 565 на расстоянии 1500 м при температурах -20 , $+20$ и $+30$ °С. Чтобы продемонстрировать различие в изменении потерь на разных частотах, показаны результаты для трех частот полосы -50 МГц, 200 МГц и 300 МГц. Эти частоты взяты произвольно, но на более высоких частотах это различие выражено еще сильнее.

Таблица 14.1

Потери в кабеле при различных температурах

Температура	50 МГц	200 МГц	300 МГц
+30 °С	26,4 дБ	56,7 дБ	66,9 дБ
+20 °С	27,0 дБ	55,5 дБ	65,5 дБ
-20 °С	25,2 дБ	51,8 дБ	61,0 дБ

На рис. 14.1 изображены три магистральных участка с четырьмя магистральными усилителями, соединенными коаксиальным кабелем серии 565. К этому примеру в различных вариациях использования усилителей с устройствами АРУ и без них будем возвращаться неоднократно. В данном случае все уровни передачи и потери взяты для частоты 300 МГц и предполагается, что все усилители системы рассчитаны на входные уровни $+8$ дБ·мВ и выходные уровни $+40$ дБ·мВ. Сперва рассмотрим ситуацию, когда усиление каждого усилителя устанавливается один раз вручную и автоматическая регулировка усилителя не обеспечивается.

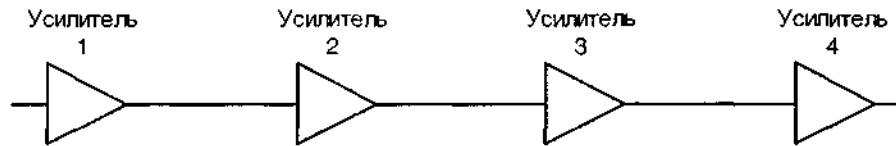


Рис. 14.1. Усилительные участки без АРУ

В табл. 14.2 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.1, при различных температурах. Рассчитывались выходные уровни усилителей $S_{\text{вых}}$, потери в соединительном кабеле L_x и входные уровни усилителей $S_{\text{вх}}$. По этой таблице можно проследить не только изменение потерь в кабеле от температуры, но и эффект накопления этих потерь во входных и выходных уровнях. Наблюдается отклонение рабочих характеристик кабельной сети от расчетных значений. Можно видеть, что при температуре $+20$ °С все входные и выходные уровни поддерживаются на тех значениях, которые были выбраны разработчиком. Однако, при $+30$ °С обнаруживаем, что уровень на входе 4-го усилителя равен $+5,9$ дБ·мВ, а не требуемые $+8$ дБ·мВ. При -20 °С уровень на выходе 3-го усилителя составляет $44,4$ дБ·мВ, хотя при проектировании установлено значение $+40$ дБ·мВ. Очевидно, что при таких отклонениях рабочих уровней шум и интермодуляция в конце каскада усилителей любой значительной длины становятся неприемлемо высокими.

Отклонение уровней при изменении температуры

T, °C	1 участок			2 участок			3 участок		
	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ
+30	40,0	32,7	7,3	39,3	32,7	6,6	38,6	32,7	5,9
+20	40,0	32,0	8,0	40,0	32,0	8,0	40,0	32,0	8,0
-20	40,0	29,8	10,2	42,2	29,8	12,4	44,4	29,8	14,6

При проектировании кабельной системы все расчеты ее рабочих характеристик выполняются в предположении, что температура кабеля равна некоторой среднегодовой температуре (например, 0 °C). В проекте указывается эта средняя температура и вместе с ней указывается допустимый диапазон изменения температуры, при котором гарантируется, что рабочие характеристики системы останутся в норме. Поддержание нормативных рабочих характеристик системы как раз и обеспечивается механизмом автоматической регулировки усиления, основанном на автоматическом температурном контроле.

Заметим, что в любом усилителе предусмотрена регулировка усиления или наклона. Однако в одних усилителях эта регулировка выполняется вручную при настройке с помощью переменных аттенюаторов, плавных или ступенчатых. Такие усилители не способны самостоятельно реагировать на изменение уровня передачи в кабеле, т.е. их регулировка невозможна без вмешательства человека. Другие усилители имеют устройства регулировки, называемые автоматическими, которые могут без вмешательства обслуживающего персонала реагировать на изменение уровня сигнала изменением своего коэффициента усиления. Нас интересуют именно усилители второго типа, поскольку ясно, что компенсация влияния постоянно меняющейся температуры должна осуществляться оперативно и только устройства автоматической регулировки соответствуют этому требованию.

Простейшим примером устройств автоматического температурного контроля являются термостаты (термодатчики), которыми постоянно пользуемся в быту для управления домашними нагревательными и охлаждающими приборами. Термостат при понижении или превышении некоторой температуры вырабатывает управляющее напряжение, который определенным образом воздействует на прибор, например, включая или выключая его. Аналогичное устройство может применяться для контроля над изменением рабочей температуры кабеля и управления усилителями в кабельной сети. Этот метод, применительно к кабельной сети, можно назвать методом пассивного термического контроля. Термический датчик (термистор) включается для контроля затухания на радиочастотах, которое автоматически уменьшается или увеличивается, отражая колебания температуры окружающей среды. В начале развития систем КТВ такой контроль обычно выполнялся в небольших устройствах, которые включались прямо в коаксиальный кабель в тех точках, где подсказывал опыт разработчика и данные эксплуатации. Такие устройства иногда включаются в усилитель в промежуточной ступени.

14.1. Зависимость потерь в кабеле от температуры

Метод с использованием термостата может быть назван методом "грубой" регулировки, так как он неприменим для длинных каскадов протяженных кабельных систем. Например, участок кабеля, где установлен датчик, может быть расположен в тени, тогда как большая часть кабеля может подвергаться воздействию прямых солнечных лучей. Разница температур между этими двумя областями может быть значительной и, поэтому, производимая компенсация будет неточно отражать отклонение температуры, которому в действительности подвергается кабель. Главным недостатком этого метода является то, что он не обеспечивает адекватной коррекции в ответ на случайное изменение уровня сигнала. Если, по одной из множества причин, уровень сигнала изменится без изменения температуры, то пассивный термический контроль не будет действовать. Этот метод, хотя и может использоваться в небольших системах, по сути малоэффективен и создает множество неудобств в эксплуатации и обслуживании системы, а также затрудняет любое последующее расширение такой системы.

Гораздо более эффективный контроль уровней передачи в системе может быть достигнут путем ответвления и измерения амплитуды специальных контрольных ВЧ несущих (пилот-сигналов) или обыкновенных телевизионных сигналов, предназначенных для управления. Такой метод называется регулировкой усиления с обратной связью. С его помощью ВЧ затухание может быть введено или снижено на пути радиочастотной передачи усилителя в количестве, прямо пропорциональном амплитуде измеренного контрольного сигнала. Этот способ контроля называется автоматической регулировкой с обратной связью и именно ее будем иметь в виду, говоря далее об устройствах АРУ и АРН.

14.2. Принцип действия автоматической регулировки

Существует два варианта автоматической регулировкой с обратной связью. Если используется одна контрольная несущая, то регулировка обеспечивается только по одной частоте спектра системы передачи, и в результате такой регулировки получаем ровную амплитудно-частотную характеристику с одинаковыми уровнями во всем спектре. Если же используется два отдельных контрольных сигнала в различных точках спектра передачи, то можно обеспечить некоторую коррекцию спектра передачи с учетом его наклона. В соответствии с этим, если управляющее устройство обеспечивает регулировку по уровню одной контрольной несущей, то метод называется Автоматической Регулировкой Усиления, АРУ (Automatic Gain Control, AGC). Его действие заключается в том, что если контрольное устройство обнаруживает снижение уровня контрольного сигнала на 1 дБ, то уровни сигналов всех частот просто повышаются на 1 дБ. Если контрольное устройство обеспечивает регулировку по уровню двух контрольных несущих (в начале и в конце спектра передачи), то метод называется Автоматической Регулировкой Наклона, АРН (Automatic Slope Control, ASC). В результате такой регулировки получим "наклонную" характеристику, поскольку компенсация затухания будет не одинаковой в пределах всей интересующей нас полосы спектра, а пропорциональной затуханию сигнала на разных частотах спектра. Устройства обоих типов действуют на основе одного и того же принципа автоматической компенсации затухания с помощью управляющего сигнала обратной связи, поэтому все, что будет здесь сказано об АРУ справедливо и для АРН.

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

Устройства АРУ и АРН обычно встроены в усилитель в качестве промежуточных блоков или ступеней, которые имеют незначительное влияние на отношение С/Н усилителя. Контрольный сигнал отводится с помощью направленного ответвителя на радиочастотном выходе усилителя. В ответ на снижения уровня сигнала (рост затухания) автоматически увеличивается усиление усилителя. Блоки АРУ иногда расценивают как модули, предназначенные для преодоления низких входных уровней сигналов. Сам усилительный модуль имеет очень высокое усиление (резервное усиление), а устройства регулировки только повышают или снижают затухание на пути передачи ВЧ сигнала внутри усилителя. Устройство автоматической регулировки должно иметь некоторый диапазон компенсирующей способности или диапазон регулировки, в пределах которого оно гарантирует поддержание выходного сигнала усилителя на требуемом уровне или, чаще, с заданной точностью. Например, если сказано, что диапазон регулировки АРУ составляет 4 дБ, это означает, что данное устройство способно компенсировать изменение входного уровня сигнала на ± 4 дБ (всего на 8 дБ), причем отклонение выходного уровня от требуемого значения не будет превышать $\pm 0,3$ дБ. Методы авторегулировки практически необходимы в любой более или менее длинной системе. Поэтому очень важно понимать, как она действует в реальной системе.

Принцип действия АРУ проиллюстрирован на рис. 14.2.

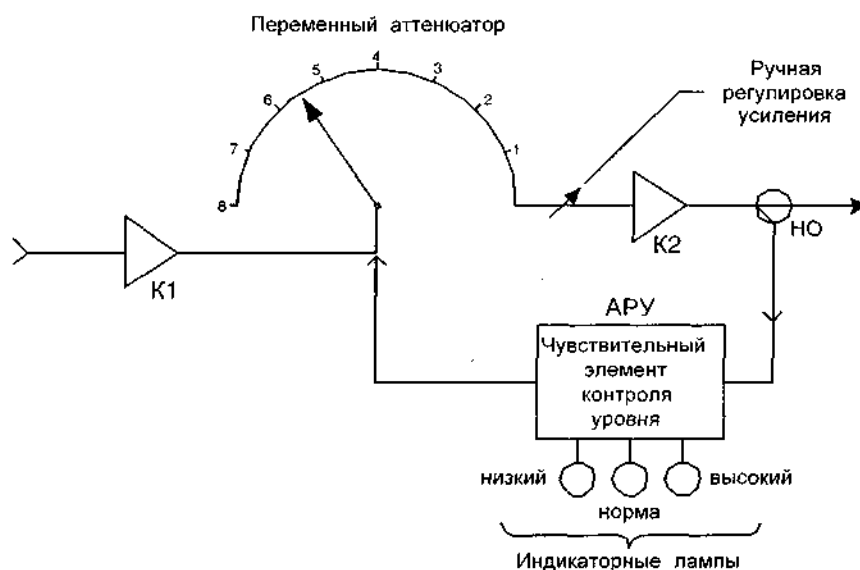


Рис. 14.2. Принцип действия АРУ

Здесь видим три основных блока, участвующих в схеме автоматической регулировки – переменный аттенуатор, направленный ответвитель и само устройство АРУ, содержащее чувствительный элемент. Кроме того показаны две ступени усиления – входная K1 и выходная K2. Переменный аттенуатор здесь лишь вносит затухание в сигнал, но его можно рассматривать как еще одну, промежуточную, ступень усилителя с переменным коэффициентом усиления.

14.2. Принцип действия автоматической регулировки

Отводимый с высокочастотного выхода усилителя контрольный сигнал подается на чувствительный элемент устройства АРУ. В нем измеряется амплитуда этого сигнала, в результате чего вырабатывается постоянное управляющее напряжение, величина которого отражает величину изменения выходного уровня. Затем управляющее напряжение подается ВЧ аттенюатор, расположенный в промежуточной ступени усилителя.

В схеме на рис. 14.2 показаны для наглядности также три индикаторных лампы (разумеется их нет в схеме реального усилителя), с помощью которых чувствительный элемент указывает нам, что он обнаружил низкий, нормальный или высокий уровень сигнала на выходе усилителя. Допустим, что можем, отключив автоматическую регулировку, самостоятельно выполнять ее функции, т.е. реагировать на показания этих индикаторов, вручную переключая переменный ВЧ аттенюатор на большее или меньшее значение затухания. Этой условностью будем пользоваться в приводимых далее примерах для пояснения действия механизма АРУ.

14.3. Настройка АРУ

Рассмотрим подробнее принцип действия механизмов автоматической регулировки и способ расчета необходимой величины корректировки. Для этого приведем несколько примеров, поясняющих реакцию усилителя с АРУ на различные воздействия при разных условиях начальной настройки. Будем подавать на вход усилителя сигнал с уровнем +8 дБ·мВ, измеряемым по специальной контрольной несущей. Установим сперва переменный аттенюатор в среднее положение, т.е. на значение вносимого затухания 4 дБ. Далее будем настраивать устройство регулировки усиления для получения требуемого уровня на выходе усилителя. Допустим, требуемый номинальный выходной уровень равен +40 дБ·мВ. Поскольку чувствительный элемент “не знает” требуемой величины выходного уровня, допустим, что этот элемент был предварительно откалиброван так, чтобы при уровне +40 дБ·мВ загорался индикатор “нормальный”, а оба других индикатора (“низкий” и “высокий”) были погашены. При понижении или превышении уровня +40 дБ·мВ, соответственно, загорается только лампа “низкий” или “высокий”.

Пример 1.

Если при сделанных предположениях уменьшим входной уровень на 2 дБ (до +6 дБ·мВ), то на 2 дБ уменьшится уровень на выходе усилителя (до +38 дБ·мВ) и уровень отводимого сигнала, подаваемого на чувствительный элемент. Чувствительный элемент обнаружит это уменьшение и погасит индикатор “нормальный”, а индикатор “низкий” загорится. Ответим на эту индикацию переключением переменного аттенюатора, уменьшая его затухание с 4 дБ до 2 дБ, чтобы выходной уровень усилителя вернулся к значению +40 дБ·мВ. Когда чувствительный блок определит, что установлен прежний уровень выходного сигнала, индикатор “низкий” выключится и снова загорится индикатор “нормальный”. Видим, что механизм АРУ сработал – входной уровень на усилителе упал до +6 дБ·мВ, а выходной уровень при этом не изменился и остался номинальным +40 дБ·мВ.

Теперь, не меняя положение переменного аттенюатора, вернем входной уровень нашего сигнала к его первоначальному номинальному значению +8 дБ·мВ,



Рис. 14.3. Настройка АРУ (примеры 1, 3, 4)

т.е. повысим уровень на 2 дБ. На выходе усилителя уровень также повысится на 2 дБ. Чувствительный элемент обнаружит повышение уровня, погасит индикатор “нормальный” и включит индикатор “высокий”. На этот раз ответим увеличением затухания переменного аттенюатора на 2 дБ, чтобы вернуть выходной сигнал к номинальному уровню +40 дБ·мВ, чтобы погасла лампа “высокий” и загорелась лампа “нормальный”.

Таким образом, вернулись к условиям первоначальной установки АРУ с номинальным уровнем на входе усилителя (+8 дБ·мВ), средним затуханием переменного аттенюатора (4 дБ), номинальным уровнем на выходе усилителя (+40 дБ·мВ) и показанием “нормальный” на индикаторе чувствительного элемента. Заметим, что диапазон регулировки АРУ определяется диапазоном перестройки переменного ВЧ аттенюатора (от 0 до 8 дБ). Определим диапазон автоматической регулировки как “окно АРУ”.

Во время первоначальной настройки АРУ расположим окно так, чтобы обеспечить компенсирующую способность ± 4 дБ по отношению к номинальному выходному уровню +40 дБ·мВ. Это обеспечивается путем установки переменного аттенюатора в среднее положение и последующей его регулировкой. Доступный размер окна составляет 8 дБ.

Если бы изменения во входном уровне усилителя, вносимые искусственно, были вызваны изменением температуры длинного участка кабеля, подключенного к усилителю, то действие механизма компенсации было бы в точности таким же. На рис. 14.3 показано расположение окна по отношению к диапазону ручной регулировки усиления и к номинальному выходному уровню +40 дБ·мВ.

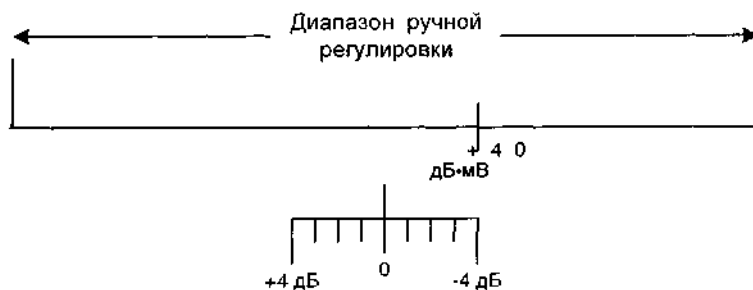


Рис. 14.4. Настройка АРУ (пример 2)

Здесь видим, что при таком положении окна изменение входного уровня на ± 4 дБ может быть легко компенсировано путем изменения значения ВЧ затухания на аттенюаторе.

Пример 2.

При той же первоначальной установке с входным уровнем +8 дБ·мВ, выходным уровнем +40 дБ·мВ и включенным индикатором “нормальный” выключим переменный аттенюатор, т.е. переключим его затухание на 0 дБ. На рис. 14.4 показано новое расположение окна по отношению к диапазону регулировки выходного уровня и к номинальному выходному уровню +40 дБ·мВ. Теперь, как и ранее уменьшив входной уровень усилителя на 2 дБ. Поскольку ничто больше не менялось, уровень на выходе усилителя уменьшится соответственно на 2 дБ, чувствительный элемент обнаружит падение выходного уровня, выключит индикатор “нормальный” и включит индикатор “низкий”. В предыдущем примере была реакция на индикацию низкого уровня уменьшением затухания на переменном аттенюаторе, но в этом случае не невозможно это сделать, поскольку аттенюатор уже установлен на минимальное значение (0 дБ). Следовательно, теперь механизм АРУ не может компенсировать отклонение выходного уровня от номинала, поскольку его окно находится на краю диапазона перестройки аттенюатора, и выходной уровень останется на значении +38 дБ·мВ.

Внесем при том же положении аттенюатора другое изменение во входной уровень сигнала, увеличив его на 6 дБ от номинального значения, т.е. до +14 дБ·мВ. Выходной уровень также увеличится на 6 дБ до значения +46 дБ·мВ, чувствительный элемент погасит индикатор “нормальный” и включит индикатор “высокий”. Для компенсации этого изменения установим затухание аттенюатора на значение 4 дБ и, тогда, выходной уровень восстановится до +40 дБ·мВ, а чувствительный элемент включит индикатор “нормальный”. Заметим, что хотя в этом примере диапазон аттенюатора был тот же, но окно АРУ было расположено так, что номинальный выходной уровень +40 дБ·мВ оказался на краю диапазона компенсации. По причине такого неправильного расположения механизм АРУ не мог использовать регулировку усиления для компенсации падения уровня ниже +40 дБ·мВ, но в то же время оказался способен компенсировать более высокие, чем раньше, уровни (вплоть до +48 дБ·мВ). Однако АРУ по-прежнему имеет диапазон компенсации, равный 8 дБ.

Пример 3.

При среднем положении аттенюатора 4 дБ увеличим входной уровень на 5 дБ. Выходной уровень увеличится так же и чувствительный элемент включит лампу “высокий”. Увеличим затухание до максимально возможного значения от 8 дБ, но это не позволит вернуть номинальный выходной уровень (+40 дБ·мВ), поскольку АРУ окажется на пределе диапазона компенсации, т.е. на краю окна. Механизм АРУ не компенсирует в полной мере такое увеличение входного уровня и выходной уровень будет равен +41 дБ·мВ, а индикатор “высокий” останется включенным. Привести уровень к номинальному теперь можно будет только с помощью дополнительной компенсации, если усилитель снабжен еще одним устройством АРУ.

Пример 4.

Необходимо рассмотреть еще один вариант действия механизма АРУ – в случае полной потери контрольной несущей. Как говорилось ранее, уровень сигнала в примере измеряется по специальной контрольной несущей. Теперь

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

при прежней первоначальной настройке (входной уровень +8 дБ·мВ, затухание аттенюатора 4 дБ, выходной уровень +40 дБ·мВ и показание индикатора «нормальный») будем имитировать потерю контрольной несущей путем ее удаления с входа усилителя. В этом случае на выходе усилителя контрольной несущей также не будет, но чувствительный блок не является достаточно интеллектуальным устройством, чтобы обнаружить полное отсутствие несущей. Поэтому он будет расценивать это лишь как падение уровня несущей и покажет понижение выходного уровня. Устройство АРУ должно отреагировать на это уменьшением затухания, но даже если установим аттенюатор в положение 0 дБ, номинальный выходной уровень не восстановится, поскольку он вовсе отсутствует. В этих условиях усилитель будет производить максимальное усиление. Если остальные телевизионные сигналы при этом нормально проходят через усилитель (пропала только контрольная несущая), то отклонение уровней от нормативных значений никак не будет компенсироваться. Поэтому при повышении выходного уровня любого телевизионного сигнала (по сравнению с нормативным), например, на 4 дБ вносимая усилителем интермодуляция станет на 8 дБ хуже, чем в условиях нормального функционирования устройства АРУ.

В приведенных примерах искусственно изменялся уровень сигнала на входе усилителя. В реальных условиях, когда АРУ включено в схему действующих усилителей в каскаде кабельной сети, эти изменения могут быть в действительности вызваны изменением температуры соединительных кабелей или некорректной настройкой усилителя обслуживающим персоналом или износом оборудования. Смысл автоматической регулировки состоит в том, что чувствительный элемент вырабатывает управляющее напряжение, которое напрямую переключает затухание аттенюатора. Поскольку цепь обратной связи, в которой установлен чувствительный элемент, подключается к выходу усилителя, то чувствительный элемент обнаруживает и корректирует изменение выходного уровня, а изменение входного уровня только обнаруживает, но не корректирует. Уровни +8 дБ·мВ на входе и +40 дБ·мВ на выходе здесь были взяты произвольно. Посмотрим, как в действительности разработчик определяет эти уровни, и, какой этап проектирования системы следует за установкой усилителей с АРУ. В предыдущих главах уже обсуждались некоторые детали процесса проектирования, касающиеся определения требований к окончательным характеристикам систем, согласования с ними протяженности системы, числа усилителей в каскаде, характеристик усилителей и затем, на этой основе выбора рабочих входных и выходных уровней. Все эти этапы необходимы в процессе разработки системы передачи для гарантирования полного соответствия построенной системы окончательным требованиям. Теперь следует проверить, соответствуют ли рассчитанные характеристики системы окончательным требованиям в реальных условиях окружающей среды (прежде всего, температурных условиях), действию которых будет подвергаться кабельная сеть. При этом нужно сохранить первоначальную целостность проекта, т.е. не выходить за рамки выделенных ресурсов оборудования, не изменять требуемую протяженность системы и, в конечном итоге, по возможности не допускать резкого увеличения стоимости системы.

Разработчик должен на основании данных о величине сезонных колебаний температуры, которым подвергается кабельная сеть в данной области, и заложенных в проекте данных о длинах кабельных участков, рассчитать отклонения уровней передачи, чтобы система адекватно справлялась с влиянием темпера-

14.3. Настройка АРУ

туры. Этот расчет необходимо сделать до включения в проект устройств авторегулировки. Далее, на основе полученных отклонений разработчик должен оценить технические и экономические эффекты от использования устройств АРУ с различной плотностью в системе. Это значит, что потребуется получить и сравнить результаты при установке АРУ сначала в местах расположения каждого усилителя, затем на каждом втором усилителе и так далее. По этим результатам можно будет принять решение об оптимальной плотности АРУ. Например, в кабельных сетях с подземной прокладкой, где колебания температуры гораздо менее сильны, можно отказаться от авторегулировки на каждом пятом усилителе. С экономической точки зрения следует стремиться к использованию как можно меньшего количества усилителей с АРУ, поскольку они являются более сложными устройствами и, следовательно, имеют в среднем большую стоимость, чем регулируемые вручную усилители, не обеспечивающие автоматической компенсации. Но с развитием оборудования на интегральных схемах различие в стоимости между усилителями с АРУ и простыми усилителями с ручной регулировкой уже не является значительным, поэтому аргументы за использование большего количества блоков с АРУ часто оказываются более убедительными, чем незначительная экономия на их стоимости.

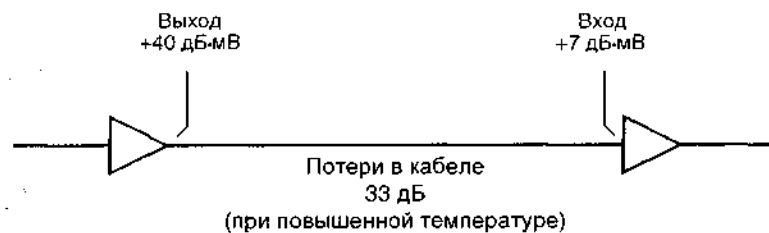


Рис. 14.5. Потери в кабеле (пример 5)

Действительные уровни в системе передачи должны рассчитываться для средней (нормальной) температуры окружающей среды, в которой находится кабель, а диапазон отклонения уровней, соответствующий данному диапазону температуры, вычисляется из расчета, что изменению температуры на один градус соответствует изменение потерь в кабеле менее чем на десятую процента. Только при выполнении этих условий устройства АРУ будут способны обеспечить полную компенсацию отклонения уровней после первоначальной настройки положения окна авторегулировки АРУ. В противном случае регулировка уровней во всей системе будет серьезно нарушена.

Пример 5.

На рис. 14.5 изображены два усилителя, из которых первый создает выходной уровень +40 дБ·мВ. К его выходу подключен второй усилитель посредством коаксиального соединительного кабеля, который при нормальной температуре +20 °С вносил потери передачи 32 дБ. Следовательно, на входе второго усилителя в каскаде уровень будет равен +8 дБ·мВ. Предположим, что потери передачи в кабеле увеличились на 1 дБ из-за повышения температуры и составляют теперь 33 дБ, а не 32 дБ, как ожидал разработчик. Тогда входной уровень на втором усилителе будет составлять +7 дБ·мВ, а не требуемые +8 дБ·мВ. Второй усилитель, если в нем не использовалась АРУ, передаст это отклонение на выход, где уровень будет составлять +39 дБ·мВ. При этом может сложиться

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

ситуация, когда будет выполняться регулировка для нормальной настройки АРУ усилителя, как это происходило в примере 1 (рис. 14.3), но окно окажется неправильно расположенным, как показано на рис. 14.6. Атенюатор был установлен в среднее положение (на 4 дБ), и авторегулировка восстановила выходной уровень до +40 дБ·мВ. На первый взгляд кажется, что АРУ действует правильно, но нельзя забывать о том, что АРУ выполнило регулировку, правильную для входного уровня +8 дБ·мВ, в то время как в действительности он был равен +7 дБ·мВ из-за повышения температуры окружающей среды.

Посмотрим, что будет происходить, если теперь температура вернется к среднему нормальному значению +20 °С. Потери в кабеле уменьшатся до 32 дБ и уровень на входе второго усилителя возрастет с +7 дБ·мВ до +8 дБ·мВ. Устройство АРУ обнаружит повышение выходного уровня второго усилителя на 1 дБ и автоматически установит затухание на 1 дБ большее, компенсируя увеличение уровня. В результате уровни на входе и выходе усилителя останутся нормальными (+8 дБ·мВ и +40 дБ·мВ соответственно). Однако, теперь окно будет расположено так, что АРУ усилителя сможет корректировать входной уровень на 5 дБ в сторону уменьшения и на 3 дБ в сторону увеличения, что хуже по сравнению с одинаковой коррекцией по 4 дБ в обе стороны. Эта несимметричность коррекции и показана на рис. 14.6.



Рис. 14.6. Неправильное расположение окна

Таким образом, расположение окна в этом примере является неправильным, поскольку оно не отвечает намерению обеспечить компенсацию уменьшения или увеличения входного уровня на 4 дБ. Ошибка настройки положения окна в 1 дБ может показаться незначительной, однако, если многие усилители с АРУ в составе длинного каскада перестраивались в течение длительного периода эксплуатации (возможно, нескольких лет) и эта ошибка вносилась каждый раз, то способность авторегулировки в системе может стать неудовлетворительной. Если, после нескольких неправильных настроек, устройства АРУ не обеспечивают компенсации в полной мере, то окончательные характеристики системы могут выйти за рамки спецификаций при тех отклонениях температуры, для которых разработчик на самом деле предусмотрел необходимую компенсацию.

Если отклонения уровня сигнала связаны с температурой, то в ходе первоначальной настройки окно АРУ нужно расположить так, чтобы оно было способно вносить симметричную коррекцию при изменении температуры. Когда температура вернется к нормальной, усилитель перестроится сам и полный

диапазон регулировки устройства восстановится. Если отклонение входного сигнала не связано с температурой, то следует искать возможные проблемы в оборудовании кабельной системы.

Обнаружение и корректировка недопустимых уровней сигналов при нормальных колебаниях температуры выполняется не только усилителями с авторегулировкой. При настройке усилителей с ручной регулировкой оператор должен установить выходные уровни исходя из известного интервала допустимых отклонений входного уровня. Возможно, настройка устройств автоматической и ручной регулировки усиления является наиболее сложной и часто неправильно выполняемой операцией в системах КТВ.

При проектировании системы передачи иногда бывает трудно определить, какая плотность устройств автоматической регулировки требуется в системе. Возможно, наилучшей отправной точкой в принятии этого решения является анализ влияния температурных изменений по нескольким параметрам структуры системы. Далее для примера рассмотрим систему, построенную на основе кабеля серии 565 с диэлектриком пористого типа, при использовании усилителей с различным усилением и при различных длинах усилительного участка. Кроме того, мы, сделаем различие между сетями с подвесной и с подземной прокладкой кабеля.

14.4. Использование АРУ в подвесных сетях

На рис. 14.7 показано влияние изменений температуры на уровни сигнала в пределах каскада из четырех усилителей.

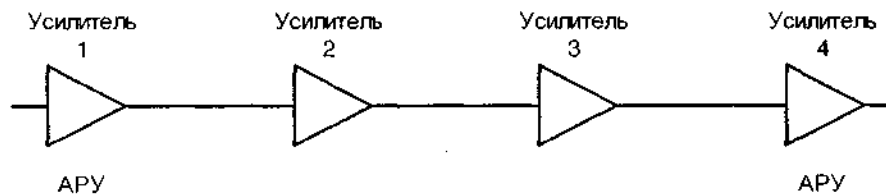


Рис. 14.7. Использование АРУ на каждом третьем усилителе

В этом примере использовалось усиление 22 дБ на каждом усилительном участке и устройства АРУ на каждом третьем усилителе. Уровни +10 дБ·мВ на входе и +32 дБ·мВ на выходе усилителей выбраны произвольно. В предположении, что устройства АРУ допускают изменения входного уровня на ± 4 дБ и при этом поддерживают +32 дБ·мВ на выходе, оказывается, что уровни сигналов на входе 4-го усилителя находятся вне диапазона возможной регулировки. При температуре -20 °С уровень на входе +14,5 дБ·мВ, поэтому это АРУ не сможет полностью компенсировать отклонение уровня до желаемого значения +10 дБ·мВ. Полагая, что АРУ усилителя использует весь свой диапазон компенсации, получим на выходе 4-го усилителя уровень +32,5 дБ·мВ, что на полдецибела выше нужного значения.

В табл. 14.3 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.7, при различных температурах. Из расчетов видно, что отношение С/Ш 4-го усилителя при +30 °С снизилось на 11,5 дБ из-за

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

уменьшения уровня входного сигнала, а кроссмодуляция 3-го усилителя при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ стала хуже на 6 дБ из-за увеличения его выходного уровня на 3 дБ. Следует иметь в виду, что рассматриваемый каскад из четырех усилителей может повторяться много раз подряд в реальной системе, и, тогда ухудшение этих показателей (уменьшение S/N и СХМ) будет происходить на каждом третьем усилителе системы. Возможно, что при крайней температуре потребуются введение дополнительной регулировки.

Таблица 14.3

Отклонение уровней при изменении температуры

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	1 участок			2 участок			3 участок		
	$S_{\text{вых}},$ дБ·мВ	$L_k,$ дБ	$S_{\text{вх}},$ дБ·мВ	$S_{\text{вых}},$ дБ·мВ	$L_k,$ дБ	$S_{\text{вх}},$ дБ·мВ	$S_{\text{вых}},$ дБ·мВ	$L_k,$ дБ	$S_{\text{вх}},$ дБ·мВ
+30	32,0	22,5	9,5	31,5	22,5	9,0	31,0	22,5	8,5
+20	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0
-20	32,0	20,5	11,5	33,5	20,5	13,0	35,0	20,5	14,5

В системе, изображенной на рис. 14.8, плотность размещения устройств АРУ увеличена до каждого второго усилителя. Все прочие условия сохранены. Оказалось, что по сравнению с предыдущим примером показатели системы сильно улучшились. Теперь наихудшее отношение при $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет на входе 3-го усилителя, а ухудшение составит 1 дБ. Наихудшее отношение S/N при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет на 2-м усилителе, где ухудшение составит около 3 дБ. Более высокая плотность АРУ требуется в случае увеличения количества усилителей в каскаде.

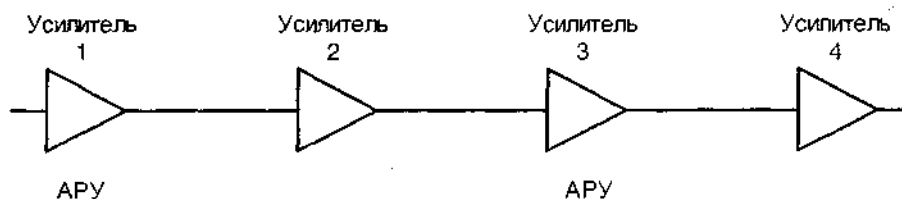


Рис. 14.8 Использование АРУ на каждом втором усилителе

В табл. 14.4 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.8, при различных температурах.

Посмотрим теперь, что произойдет, если устройство АРУ находится на каждом усилителе каскада. Такая плотность АРУ гарантирует, что кроссмодуляция в конечных точках каскада обязательно будет соответствовать рассчитанной величине. Что касается отношения S/N , то некоторое его ухудшение все-таки будет происходить (и накапливаться) на каждом усилителе, но в самом худшем случае, при температуре $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, это ухудшение составит в конечной точке системы всего лишь около 0,5 дБ. Очевидно, что с точки зрения соблюдения требуемых качественных показателей системы такая плотность АРУ является предпочтительной, но экономический фактор также следует учитывать, поэтому на практике плотность АРУ в системе обычно меньше. Кроме того, расчеты по-

казывают, что при обычной длине каскада нет необходимости в использовании АРУ на каждом усилителе.

Таблица 14.4

Отклонение уровней при изменении температуры

T, °C	1 участок			2 участок			3 участок		
	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ	S _{вых} , дБ·мВ	L _к , дБ	S _{вх} , дБ·мВ
+30	32,0	22,5	9,5	31,5	22,5	9,0	32,0	22,5	9,5
+20	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0
-20	32,0	20,5	11,5	33,5	20,5	13,0	32,0	20,5	11,5

Проделаем те же самые вычисления для каскада с усилительным участком на 32 дБ и устройствами АРУ на каждой третьей станции при входных уровнях +8 дБ·мВ и выходных уровнях +40 дБ·мВ, как показано на рис. 14.9. Наихудшее отношение C/N получаем на входе 4-го усилителя при максимальной температуре (+30 °C) – здесь оно на 2,1 дБ меньше чем требовалось.

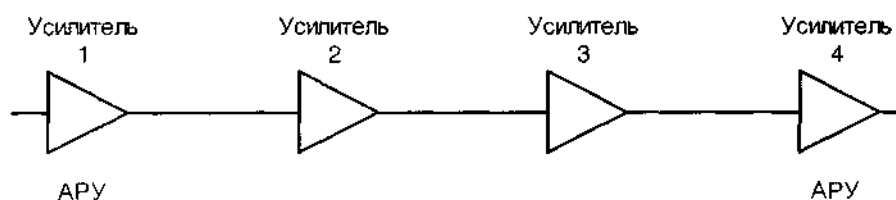


Рис. 14.9. АРУ на каждом третьем усилителе (усиление 32 дБ)

Кроссмодуляция при -20 °C на выходе 3-го усилителя ухудшается на 8,8 дБ. Наиболее важно то, что даже если АРУ 4-го усилителя допускает отклонение уровня на входе ±4 дБ, то при входном уровне +14,6 дБ·мВ это АРУ не сможет полностью скорректировать выходной уровень. Также и на 3-м усилителе при входном уровне +12,4 дБ·мВ (требуется +8 дБ·мВ), АРУ не сможет восстановить нормальный выходной уровень. Совершенно очевидно, что при потерях передачи 32 дБ в кабельном участке (и, соответственно, таком же усилении) каскад теряет правильную настройку очень быстро, даже в условиях известных колебаний температуры. В этой ситуации имеет смысл установить АРУ на каждой второй станции, но по-прежнему нет необходимости в АРУ на каждой станции. По показателям 2-го усилителя на рис. 14.9 видно, что при установке АРУ на каждой станции наихудшее C/N получится при +30 °C и будет хуже только на 0,6 дБ. Кроссмодуляция будет точно соответствовать требованиям разработчика уже при установке АРУ на каждом втором усилителе.

В табл. 14.5 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.9, при различных температурах.

С другой стороны, если усилители с АРУ устанавливаются так редко как это возможно при условии полного использования их корректирующей способности (т.е. всего диапазона компенсации), то при этом полная компенсация уровней

Отклонение уровней при изменении температуры

T, °C	1 участок			2 участок			3 участок		
	Свх, дБ·мВ	Lк, дБ	Свх, дБ·мВ	Свх, дБ·мВ	Lк, дБ	Свх, дБ·мВ	Свх, дБ·мВ	Lк, дБ	Свх, дБ·мВ
+30	40,0	32,7	7,3	39,3	32,7	6,6	38,6	32,7	5,9
+20	40,0	32,0	8,0	40,0	32,0	8,0	40,0	32,0	8,0
-20	40,0	29,8	10,2	42,2	29,8	12,4	44,4	29,8	14,6

практически не достигается и оконечные характеристики системы могут оказаться на грани допустимых значений. Однако, даже когда плотность размещения АРУ максимальна (устройство АРУ на каждой станции), полная компенсация не будет обеспечиваться, первоначальная настройка всех устройств авторегулировки была выполнена неправильно. Заметим, что усилители с более высоким усилением требуют увеличения плотности устройств АРУ, так как с их помощью увеличиваются длины кабельных участков.

Величина потерь, связанных с изменением температуры кабеля, является частью общих потерь в кабеле, и процентные величины отклонений общих потерь передачи и уровней сигналов будут одинаковыми, независимо от частоты передачи. Например, на рис. 14.7 все расчеты сделаны для частоты передачи 300 МГц. На этой частоте кабель имеет потери около 4 дБ на 100 м при температуре +20 °С. Следовательно, потери 22 дБ будет вносить кабель длиной 550 м. На частоте 400 МГц такой же кабель при той же температуре имеет потери около 4,6 дБ на 100 м, а длина участка кабеля с потерями 22 дБ будет равна примерно 480 м. Однако, на обеих частотах изменение потерь передачи составляет примерно 1% от общих потерь при соответствующей температуре. Поскольку в обоих случаях потери в кабеле составляли 22 дБ, то уровни передачи будут одними и теми же. Таким образом, представленный способ расчета в равной степени применим для любой верхней граничной частоты и различных расстояний между усилителями.

14.5 Использование АРУ в подземных сетях

Если кабель размещен под землей, то влияние изменений температуры существенно снижается. Исследования показывают, что средняя температура на глубине от полуметра до метра равна +10 °С, а максимальное отклонение температуры не превышает 15 °С, т.е. диапазон колебания температуры здесь меньше и составляет от -5 до +25 °С.

На рис. 14.10 показан каскад такой системы из четырех усилителей с АРУ на каждой третьей станции и усилительным участком на 22 дБ. За нормативное значение входного уровня в этом примере принято +10 дБ·мВ. Наихудшее отношение С/Н при температуре +25 °С будет получено на выходе четвертого усилителя, где ухудшение составит 1,8 дБ. Кроссмодуляция имеет наихудшее значение на выходе третьего усилителя при температуре -5 °С, где ухудшение составляет 2,4 дБ. На четвертом усилителе регулировка выходного уровня не будет представлять трудностей, поскольку все отклонения входного уровня на-

14.5 Использование АРУ в подземных сетях

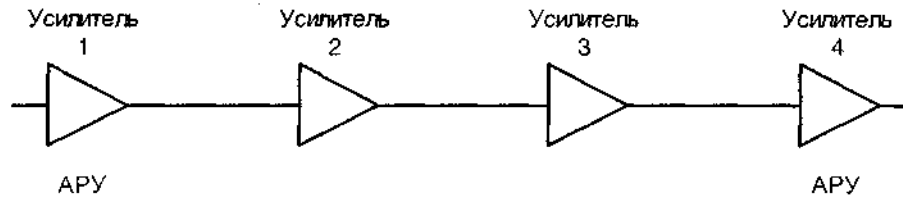


Рис. 14.10. АРУ на каждом третьем усилителе (участок на 22 дБ)

ходятся в пределах диапазона коррекции от +4 до -4 дБ. На основании этих данных сделаем вывод о том, что при проектировании этой системы можно обойтись меньшей плотностью АРУ, чем АРУ на каждой третьей станции.

В табл. 14.6 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.10.

Таблица 14.6

Отклонение уровней при изменении температуры

T, °C	1 участок			2 участок			3 участок		
	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ
+25	32,0	22,6	9,4	31,4	22,6	8,8	30,8	22,6	8,2
+10	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0
-5	32,0	21,4	10,6	32,6	21,4	11,2	32,2	21,4	11,8

Поскольку качество передачи на всех усилителях в последнем случае оказалось в норме, можно удлинить каскад. На рис. 14.11 показано продолжение каскада, изображенного на рис. 14.10, начиная с четвертого усилителя.

Полное число усилителей в каскаде, следовательно, равно семи. Здесь АРУ не использовались вовсе, но уровни сигнала в части температурного диапазона оставались в рамках допустимых значений. Можно продолжать таким образом удлинять каскад, пока входные уровни не выйдут за пределы диапазона компенсации АРУ. Оценим входной уровень 7-го усилителя при температуре +25 °C, т.е. в наихудшем случае. Этот уровень составляет +6,4 дБ·мВ, что на 3,6 дБ ниже требуемого входного уровня (+10 дБ·мВ). Поэтому отношение C/N 7-го усилителя будет на 3,6 дБ хуже, чем хотелось бы. Входной уровень 5-го усилителя при +25 °C равен +7,6 дБ·мВ, т.е. на 2,4 дБ ниже требуемого уровня +10 дБ·мВ. Поэтому пятый усилитель имеет отношение C/N на 2,4 дБ хуже, чем требуется.

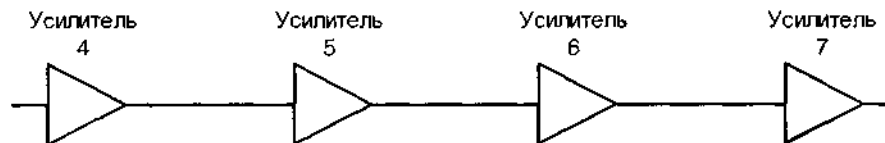


Рис. 14.11. Продолжение каскада (АРУ не используется)

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

Выходной уровень 6-го усилителя при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ теперь равен $+35\text{ дБ}\cdot\text{мВ}$, что на 3 дБ выше запланированного выходного уровня $+32\text{ дБ}\cdot\text{мВ}$. Следовательно, этот усилитель будет иметь показатель СХМ на 6 дБ ниже (хуже) допустимого.

В табл. 14.7 показано, как менялся уровень сигнала при прохождении через систему, изображенную на рис. 14.11, при различных температурах.

Таблица 14.7

Отклонение уровней при изменении температуры

T, °C	1 участок			2 участок			3 участок		
	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ	$S_{\text{вых}}$, дБ·мВ	L_k , дБ	$S_{\text{вх}}$, дБ·мВ
+25	30,2	22,6	7,6	29,6	22,6	7,0	29,0	22,6	6,4
+10	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0	32,0	22,0	10,0
-5	33,8	21,4	12,4	34,4	21,4	13,0	35,0	21,4	13,6

Анализ данных последней таблицы показывает, что лишь при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ все усилители обеспечивают отношения С/Н гораздо худшие, чем было определено в проекте. Даже с помощью АРУ на каждом усилителе невозможно устранить ухудшение С/Н на $0,6\text{ дБ}$ при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заметим, что уровень на входе 2-го усилителя на рис. 14.10, который расположен непосредственно после станции с АРУ, на $0,6\text{ дБ}$ ниже требуемого. Таким образом, при превышении температуры отношение С/Н для каскада из семи станций будет хуже как минимум на $0,6\text{ дБ}$.

14.6. Системы с высокой степенью авторегулировки

Рассматривая практическое применение устройств АРУ и АРН в различных условиях, нужно оценить, как часто в системах КТВ встречаются ситуации, требующие установки АРУ на каждой усилительной станции, и, какие это ситуации. В обычной системе КТВ за транковой подсистемой всегда следует распределительная фидерная сеть. Такая структура принимается для того, чтобы добиться снижения нелинейных искажений. По той же причине в транке нельзя допускать больших отклонений шума и интермодуляции, особенно, когда каскадная распределительная структура испытывает те же отклонения уровней передачи, основная причина появления которых кроется в колебаниях температуры. Следовательно, транк более других частей системы передачи нуждается в обеспечении высокой степени авторегулировки.

В усилителях фидерной структуры обычных городских систем кабельного телевидения АРУ зачастую может вовсе не использоваться. Так как фидерных усилителей гораздо больше, чем транковых, то экономия по всей системе получается значительной. Если АРУ устанавливается на каждом втором транковом усилителе, а промежуточные транковые усилители с ручной регулировкой служат точками распределения сигнала для двух или трех фидерных усилителей, то абоненты, находящиеся в конечных точках фидерной структуры или рядом с ними будут принимать сигнал, проходящий через три или четыре последовательно подключенных нерегулируемых усилителя. Понятно, что качество обслуживания

этих абонентов может пострадать. Поэтому и в этом случае применение АРУ на всех транковых станциях может оказаться необходимостью.

При рассмотрении усилительных каскадов сетей малого масштаба (с малым числом абонентов) с большими расстояниями между усилителями и высоким усилением нами был сделан вывод, что такие каскады очень чувствительны к колебаниям температуры. Низкая рентабельность таких сетей, создаваемых в малонаселенных районах вынуждает проектировщика использовать оборудование с высоким усилением. Следовательно, каскады таких систем также нуждаются в стопроцентной авторегулировке. Если же сеть небольшого масштаба имеет строгие ограничения по территории охвата, длинам кабельных участков и количеству усилителей в каскаде и, кроме того, использует в основном кабель, проложенный под землей или расположенный внутри зданий или сооружений, где колебания температуры ограничены (СКПТ), то такая сеть не требует использования АРУ.

Предположим, что установлена в некоторой системе структуры транк-фидер АРУ на каждом усилителе. Забудем на время об экономических аспектах такой системы и выясним, насколько значительные преимущества имеет такая структура в плане улучшения показателей функционирования. Предыдущие примеры влияния температуры на уровни сигнала в каскаде усилителей показывают, что технически вполне допустимо, чтобы устройства АРУ располагались не на каждой станции, а реже. Даже при экстремальных крайних температурах, которые очевидно будут наблюдаться редко, можно выбрать такую плотность АРУ, что ухудшение конечных характеристик системы будет оставаться в пределах нормы. Но было бы слишком просто рассматривать влияние температуры как единственную причину отклонения уровней передачи.

Существует несколько других возможных причин отклонения уровней сигнала, которые, в отличие от температурного фактора, не подлежат анализу. Например, старение оборудования или частичная потеря усиления усилителя вследствие ухудшения его характеристик не позволяют дать какой-либо логический прогноз. Небольшое изменение потерь в кабеле вызывает поступление влаги, которое также случайно и непредсказуемо действует на потери в системе передачи. Но, возможно, наиболее распространенной причиной является неправильная настройка оборудования персоналом, как во время первоначальной установки, так и при эксплуатации. Когда увеличивается количество сигналов и служб в системе, то чувствительность системы в целом к отклонению уровня увеличивается. Одновременно с этим растут требования к качеству передачи в системы и к ее надежности. Поскольку не всегда можно достоверно предсказать, в какой части системы уровни сигналов подвержены наибольшему отклонениям, то необходимо обеспечивать защиту качества передачи во всей системе в равной степени. И хотя использование автоматической регулировки не может полностью защитить оборудование от некорректной настройки персоналом и исключить его неисправности, оно может до некоторой степени снизить влияние этих факторов на систему. Например, при частичной потере усиления какого-либо одного усилителя устройство АРУ, расположенное на следующей станции, будет непосредственно корректировать его пониженный выходной уровень сигнала, компенсируя таким образом снижения уровня и ограничивая влияние этого неисправного усилителя до пределов одного кабельного участка в системе.

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

Одновременно с высокой степенью авторегулировки высокая плотность АРУ повышает надежность системы, обеспечивая резервирование. Если, например, АРУ какого-либо усилителя в системе выйдет из строя, то АРУ следующего усилителя компенсирует отклонение уровня неисправной станции и качество предоставления сигнала пользователю будет почти не затронуто. Допустим, что неисправно АРУ на каждой третьей станции. Возьмем систему, состоящую из шести кабельных участков и семи усилительных станций, из которых пять промежуточных не имеют авторегулировки. Приведенные ранее примеры показывают, что при таких условиях оконечные характеристики почти неизбежно будут неудовлетворительными.

При размещении АРУ на каждой станции еще одним очевидным преимуществом является стандартизация оборудования и связанная с этим логистика. Все усилители становятся идентичными, уменьшается разнообразие резервных блоков и запасных частей оборудования. Все рабочие уровни усилителей, по крайней мере в пределах однотипных элементов системы (например, в транке), будут примерно одинаковы. Это позволит упростить процедуру технического обслуживания системы в ходе ее эксплуатации и максимально унифицировать подход к ее проектированию. Снижение сложности процедур обслуживания системы значительно влияет на реальную эффективность долговременных капитальных затрат на строительство системы. Конечно, нельзя отказаться от сложных работ по тестированию и настройке оборудования, но вполне возможно несколько снизить требования к обслуживанию оборудования, сделав порядок обслуживания стандартным.

Существует несколько специфических проблем, относящихся к авторегулировке, которые присущи даже системам с низкой плотностью АРУ. Если в кабельной системе используется АРУ, то следует иметь в виду, что правильно она будет работать только при определенных условиях, т.е. при соответствующей настройке и полном использовании диапазона компенсации АРУ. В связи с этим нужно рассмотреть несколько ситуаций.

Рассмотрим случай полной потери контрольной несущей (или несущих). В примере 4 было показано, что в этих условиях усилитель будет создавать максимальное усиление, т.е., сигнал не будет испытывать затухания, проходя через него. Поскольку чувствительный элемент АРУ не ощущает потерю контрольной несущей, а воспринимает ее только как снижение уровня, устройство в целом совершает серьезную ошибку. Иначе говоря, использование АРУ в этом случае ухудшает показатели системы по сравнению с ситуацией, когда АРУ вовсе бы не использовалось. Следовательно, если до потери контрольной несущей усилитель работал при температуре, близкой к нормальной, и вносимое затухание было равно, например, 4 дБ, то теперь уровень сигнала на выходе усилителя увеличится на 4 дБ, поскольку АРУ усилителя установит нулевое затухание. Как известно, увеличение выходного уровня на 4 дБ немедленно приведет к уменьшению показателей СХМ и СТВ в два раза по сравнению с ростом уровня, т.е. на 8 дБ. Таким образом будут реагировать как все устройства АРУ в системе, независимо от плотности их размещения и частоты контрольной несущей, и, чем выше плотность АРУ, тем хуже будут показатели системы. Так, если бы устройства АРУ располагались на 50 % усилителей и каждый усилитель имел бы показатель СХМ на 8 дБ меньший, то окончательный СХМ уменьшился бы примерно на 4дБ. Если бы плотность размещения АРУ составляла 100%, то окончательный показатель СХМ стал бы хуже на 8 дБ. Можно

с уверенностью сказать, что оба эти условия вызовут нарушение спецификаций в оконечных точках системы. Следовательно, система нуждается в механизме защиты на этот случай.

Одним из способов устранения нежелательных последствий пропадания контрольной несущей является введение в спектр сигнала дополнительной контрольной несущей. При высокой надежности оборудования современных головных станций исчезновение контрольной несущей может показаться маловероятным, но сама возможность этого указывает на необходимость автоматического переключения на резервную несущую в случае исчезновения главной контрольной несущей. Поскольку в системе только одна головная станция и множество устройств АРУ, то было бы логично добавить в нее резервные генераторы контрольных несущих частот, несколько увеличив ее стоимость, но снизив тем самым вероятность отказа АРУ.

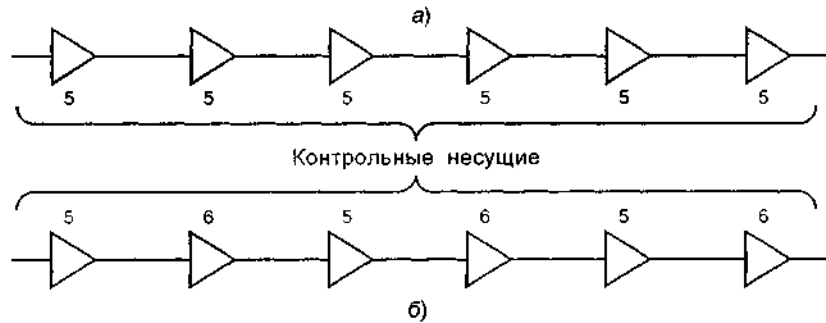


Рис. 14.12. Вспомогательные АРУ

Менее радикален вариант, когда АРУ реагирует на потерю контрольной несущей, автоматически настраиваясь на среднее значение диапазона регулировки затухания. Отклонение уровня при этом будет менее сильным, но дополнительное усложнение устройства АРУ, очевидно, повлечет и увеличение его стоимости.

Еще одним практическим способом защиты при потере несущей может быть такое расположение окна АРУ, при котором в сторону падения уровня осуществляется меньшая компенсация, чем в сторону его увеличения. Например, корректируется уменьшение входного уровня не на 4 дБ, как ранее в примере, а на 3 дБ. Если теперь контрольная несущая будет потеряна, то АРУ снизит затухание только на 3 дБ по сравнению с нормальным значением, в результате чего кроссмодуляция вырастет (СХМ упадет) только на 6 дБ, а не на 8 дБ, как было бы без введения механизма защиты.

Однако, возможен более экономичный способ защиты. На рис. 14.12,а показаны 6 усилителей, все снабжены АРУ и принимают несущую, например, 5-го телевизионного канала как контрольную несущую. Любая потеря сигнала 5-го канала будет иметь серьезные последствия для качества передачи в системе. На рис. 14.12,б в показан тот же каскад из 6 усилителей, но здесь каждая вторая станция принимает за контрольную несущую сигнал 6-го канала.

В этой схеме одновременно решается проблема резервирования и снижения сложности головной станции. Поскольку и 5-й и 6-й каналы являются обычными информационными каналами системы, то никаких дополнительных

Глава 14. Автоматическая регулировка усиления

средств на оборудование головной станции не потребуется. Сами устройства АРУ для частот 5-го и для 6-го каналов ничем не отличаются. Теперь потеря контрольной несущей или 5-го или 6-го каналов повлияет только на половину устройств АРУ, следовательно, общий нежелательный эффект на показатели качества системы будет снижен. Заметим, что не отказываясь от преимуществ использования АРУ на 100% станций, лишь иначе конфигурируем систему авторегулировки. Вероятность потери сразу двух несущих гораздо ниже, чем вероятность потери одной несущей, поэтому можно поддерживать качественное обслуживание во всей системе, так как каждый второй усилитель станция будет пытаться скорректировать отклонения уровней на соседних усилителях в случае потери одной из контрольных несущих.

Большинство современных сетей использует две несущие, обеспечивая тем самым автоматическую регулировку наклона (АРН) в системе. Все приведенные здесь примеры применимы также и использованию АРН. Например, в случае с вспомогательными контрольными несущими на каждой второй станции могут использоваться несущие 2-го и 12-го каналов, а на остальных станциях несущие 3-го и 13-го каналов.

Резюме

В настоящее время производители оборудования для систем КТВ предоставляют модели различных конфигураций и, разумеется, устройства регулировки усиления могут быть выполнены множеством разных способов. Усилители с АРУ предоставляют фиксированный ограниченный диапазон авторегулировки (окно), причем эффективность возможностей авторегулировки зависит от расположения этого окна относительно номинальных (средних) параметров сигнала и самой системы.

Решение о включении в систему устройств АРУ принимается разработчиком на основании ожидаемых колебаний температуры окружающей среды и известных длин кабеля. Разработчик рассчитывает, что каждое устройство АРУ будет обеспечивать свою определенную требуемую корректировку. Положение окна устанавливается во время первоначальной настройки устройства авторегулировки и неправильная настройка может привести к большим потерям сигнала в системе даже при условии, что авторегулировка используется на большинстве усилителей каскада.

Оценивая экономическую эффективность устройств автоматической регулировки усиления (АРУ или АРН), необходимо принимать во внимание стоимость этих устройств. В период развития систем КТВ различие в стоимости между устройствами с авторегулировкой и устройствами с ручной регулировкой было существенным. Кроме того, в то время системы КТВ имели меньшую нагрузку, поскольку переносили сигналы только нескольких ТВ каналов. В качестве практической рекомендации тогда было принято, что АРУ нужно использовать на каждой третьей станции. Сегодня разница цен на эти типы оборудования стала гораздо меньше, а большинство моделей усилителей одной линии изделий дополняются возможностями АРУ и АРН одновременно менее, чем за 100 долл. Поэтому в современных системах КТВ идея стопроцентного использования АРУ получает широкое распространение.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО УЧАСТКА

В этой главе рассмотрим различные технические аспекты проектирования усилительного участка и методики, позволяющие эффективно разработать участок, отвечающий заданным нормативным требованиям. Цель этого этапа работ – разместить максимальную ответвленную нагрузку на усилительном участке так, чтобы при этом не нарушить его спецификацию по входным и выходным уровням, т.е. добиться наибольшей эффективности ответвления сигнала.

Обратите внимание, что все значения потерь в кабеле, частот передачи, длин кабельных участков и параметров ответвителей в приводимых далее примерах будут выбраны произвольно. Эти величины специфичны как для конкретных марок и типов оборудования, которое поставляется сейчас многими производителями, так и для конкретных технических условий, в которых создается система КТВ заданного масштаба, структуры и назначения. Тип оборудования определяет, для какого уровня системы оно предназначено, например, усилители разделяются на магистральные и домовые, ответвители разделяются на магистральные и абонентские. В зависимости от этого уровни передачи, длины кабелей, коэффициенты усиления и параметры потерь различаются. Поэтому заранее оговоримся, что здесь и во всех последующих главах взятые в примерах цифры не соответствуют реальным значениям. В данном случае важно понять методику расчета, а сами значения этих величин, которые всегда приводятся в спецификациях конкретного типа оборудования, в данном случае несущественны.

Продемонстрируем на примерах варианты построения усилительных участков и возможности использования в структуре участка различных пассивных приборов. Некоторые примеры будут содержать альтернативные варианты, показывающие возможные пути решения.

15.1. Использование делителей и ответвителей

Основным структурным элементом усилительного участка является ответвитель. В гл. 7 было дано определение ответвителя, и приведена таблица с параметрами различных ответвителей. Ответвители устанавливаются в магистральной кабельной сети и в домовых распределительных сетях. К выходному порту ответвителя подключается сервисное коаксиальное ответвление, по которому сигнал подается в распределительную сеть низшего уровня или прямо на терминальное оборудование абонента. В классическом варианте структуры системы КТВ с помощью магистральных ответвителей сигнал подается через магистральные ответвления на домовые распределительные сети, а с помощью абонентских ответвителей сигнал подается через абонентские ответвления на телевизоры.

Глава 15. Проектирование усилительного участка

В табл. 15.1 приведены параметры для серии устройств, имеющих ширину полосы 900 МГц. Заметим, что для каждого ответвителя в таблице приведены два номинальных значения потерь – одно на частоте 50 МГц, а другое на частоте 900 МГц. При проектировании широкополосной кабельной системы необходимо выполнить две серии вычислений, в одной из которых рассчитываются накопленные потери на нижней частоте полосы прямого канала, а во второй рассчитываются потери на его верхней частоте. Если в системе предусмотрен обратный канал, для него также следует выполнить серию расчетов.

Таблица 15.1

Параметры ответвителей

Номинал, дБ	50 МГц		900 МГц	
	Потери ответвления, дБ	Вносимые потери, дБ	Потери ответвления, дБ	Вносимые потери, дБ
<i>Ответвители с 2 выходными портами</i>				
38	38,2	0,3	39,5	0,8
35	35,2	0,3	36,2	0,7
32	32,0	0,3	34,0	0,6
29	29,4	0,3	31,0	0,7
26	26,0	0,4	27,0	0,7
23	23,3	0,3	24,0	0,8
20	19,5	0,4	20,4	0,8
17	17,1	0,3	17,5	1,0
14	14,6	0,7	16,0	1,3
12	11,7	1,1	12,0	2,3
10	10,1	1,5	11,0	2,0
7	6,4	3,4	7,0	4,3
4Т (терм.)	3,4	–	3,7	–
<i>Ответвители с 4 выходными портами</i>				
38	38,2	0,3	39,0	0,6
35	35,5	0,3	36,1	0,7
32	32,0	0,3	32,1	0,7
29	29,6	0,3	30,2	0,4
26	26,2	0,3	26,5	0,75
23	23,4	0,3	22,8	1,3
20	20,1	0,6	20,2	1,1
17	17,2	0,9	16,8	1,6
15	15,5	1,0	16,1	1,9

15.1. Использование делителей и ответвителей

Номинал, дБ	50 МГц		900 МГц	
	Потери ответвления, дБ	Вносимые потери, дБ	Потери ответвления, дБ	Вносимые потери, дБ
14	13,8	1,5	14,2	2,0
12	12,1	2,3	12,8	3,0
10	10,0	3,4	11,4	3,85
7Т (терм.)	6,4	–	7,0	–
<i>Ответвители с 8 выходными портами</i>				
38	39,3	0,3	39,5	0,6
35	35,9	0,4	36,5	0,7
32	33,1	0,3	33,2	0,7
29	29,4	0,3	30,0	0,7
26	26,7	0,4	27,0	0,85
23	24,8	0,5	24,2	1,4
20	21,5	0,7	21,6	1,5
17	18,8	1,5	18,4	2,0
14	16,1	2,7	16,5	3,1
10Т (терм.)	10,2	–	11,6	–

Выбор ответвителей с определенными параметрами делается разработчиком в зависимости от условий конкретной задачи, т.е. от того, какую распределительную структуру он хочет построить в данной обслуживаемой области. Исходными данными для решения этой задачи являются количество абонентов в области обслуживания, плотность местной застройки и плотность расположения сервисных точек на пути кабельного маршрута, планируемое число подключившихся абонентов (процент проникновения), сложность застройки и некоторые другие условия. С помощью линеек ответвителей, предлагаемых сейчас на рынке различными производителями, можно построить практически любую сложную и разветвленную распределительную структуру. В каждой предполагаемой точке включения ответвителя проектировщик рассчитывает уровень сигнала, а затем, исходя из него и расположения сервисных точек, выбирает тот или иной ответвитель. Например, если в данной точке требуется подключить одну точку, то выбирается ответвитель "на 2", имеющий два выходных порта (проходной и ответвленный). Если в некоторой точке требуется подключить три точки или более, выбирается ответвитель "на 4" или "на 8". В окончании кабельного ответвления устанавливается "терминирующий" ответвитель с заглушкой (сопротивлением 75 Ом) для согласования импедансов и, тем самым, устранения отраженной волны. Далее подробнее рассмотрим выбор ответвителей в процессе проектирования участка.

Ниже показаны три способа организации расходящихся усилительных участков путем разветвления кабельного маршрута с помощью делителей и направленных ответвителей. Допустим, что все направления или маршруты кабеля на этих схемах являются равноправными, например, магистральными. Во

Глава 15. Проектирование усилительного участка

всех участках установлены усилители одного типа. Понятия основной и второстепенный используются только для различия участка до ответвления и после.

На рис. 15.1 показан типичный случай использования делителя, когда сигнал из одного кабеля нужно подавать в два расходящихся кабельных маршрута. При этом энергия и, соответственно, уровень сигнала из основного кабеля разделяется поровну между двумя направлениями, поскольку делитель, по определению, является прибором, который делит уровень входящего сигнала поровну между всеми своими выходами (двумя или более).

Рабочие уровни сигналов и потери в кабеле должны быть прежде всего определены для верхней частоты полосы системы. Положим произвольно, что верхняя частота нашей системы равна 900 МГц, и потери в кабеле на этой частоте составляют 8 дБ на 100 м. Допустим, что входной уровень каждого усилителя равен +10 дБ·мВ, а выходной уровень равен +32 дБ·мВ.

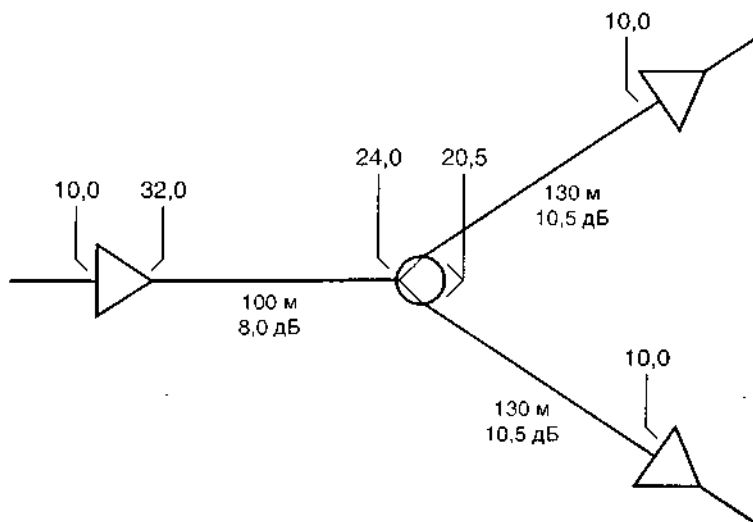


Рис. 15.1. Использование делителя

Теперь, имея эти данные, нужно решить следующий вопрос – на каком расстоянии от делителя следует расположить первый усилитель в каждом из расходящихся кабельных маршрутов. Как показано на рис. 15.1, каждый усилитель можно расположить на расстоянии 130 м от делителя или на расстоянии 230 м от предыдущего усилителя в основном кабеле. Обратите внимание, что потери сигнала на каждом выходе делителя составляют 3,5 дБ.

На рис. 15.2,а показана ситуация, когда нужно расположить усилитель в одном из направлений на меньшем расстоянии от делителя, чем в другом направлении. В данном случае усилитель во втором направлении располагается на расстоянии 50 м от делителя. Делитель будет создавать на входе усилителя уровень +16,5 дБ·мВ, который выше, чем необходимо. Можно было бы просто выровнять это значение до требуемого +10 дБ·мВ, вводя дополнительное ослабление, но на рис.15.2,б однако видится более эффективное решение. Здесь показано использование направленного ответвителя на 10 дБ вместо делите-

15.1. Использование делителей и ответвителей

ля. Это создает требуемый уровень +10 дБ·мВ на входе следующего усилителя при длине кабеля 50 м. Однако, при этом в первом направлении кабеля расстояние до следующего усилителя увеличивается до 160 м, по сравнению с предыдущим расстоянием 130 м.

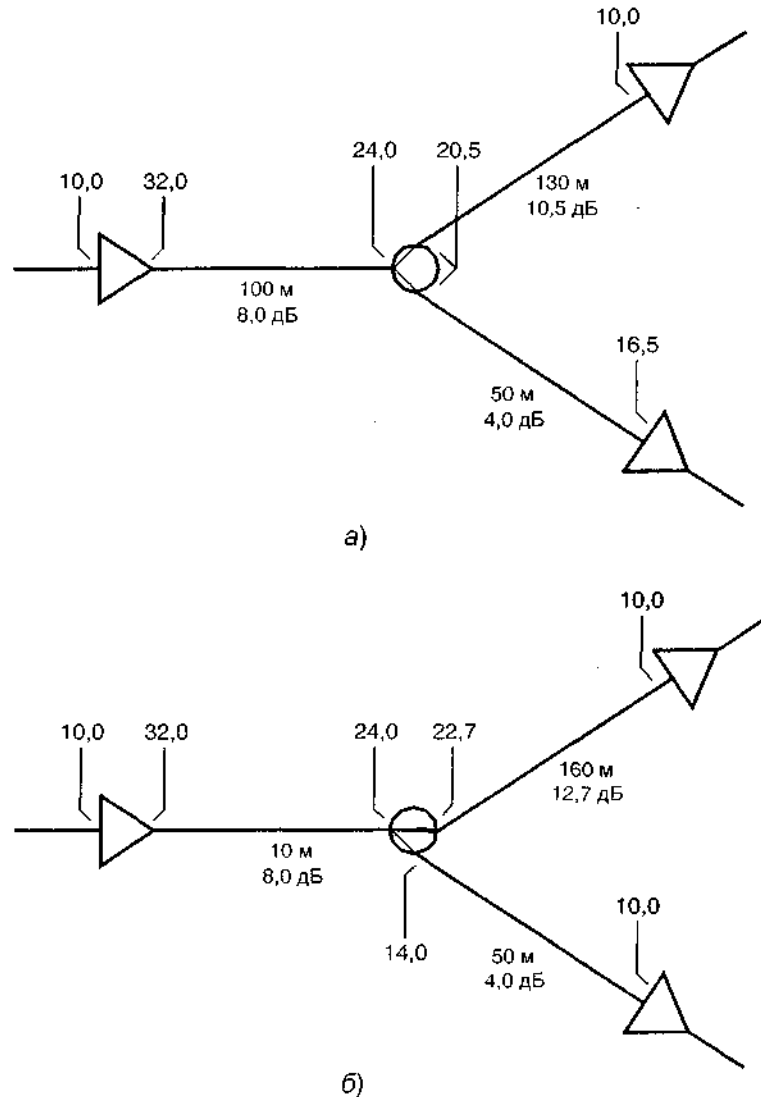


Рис. 15.2. Использование делителя и ответвителя:
а – делитель; б – ответвитель

Заметим, что уровень на входе усилительного блока по-прежнему соответствует требуемому +10 дБ·мВ. Таким образом, направленный ответвитель обеспечивает полное согласование уровней передачи, но увеличивает протяженность одного из усилительных участков в данном примере на 30 м. В боль-

Глава 15. Проектирование усилительного участка

ших системах подобные ситуации могут способствовать уменьшению требуемой длины каскада усилителей.

15.2. Методика проектирования

После получения технического задания разработчик в первую очередь принимает решение по таким параметрам системы передачи как протяженность усилительных участков и усиление усилителей. Как только эти параметры выбраны, можно приступать уже собственно к проектированию кабельной системы. В этой главе рассмотрим важнейший этап проектирования, связанный с проектированием усилительного участка, который является основным элементом распределительной кабельной сети. Усилительным участком называется система, состоящая из нескольких ответвителей, к которым подключены сервисные ответвления, отрезков соединительного кабеля, одного усилителя, расположенного в окончании участка и, возможно, эквалайзера. Хотя говорим, что усилитель расположен в конце участка, можно рассматривать и участок с усилителем, расположенным в его начале. Это безразлично, если все усилители на основном маршруте кабеля выбираются одинаковыми и обеспечивают стандартное усиление.

Сервисные ответвления оканчиваются сервисными точками, которыми являются (в зависимости от иерархического уровня системы) точки доступа в домовые распределительные сети или конечные абонентские точки. В классическом варианте усилитель полностью компенсирует потери, вносимые на участке кабелем, ответвителями и эквалайзером, а участок в целом имеет нулевое усиление (или нулевые потери). Но в реальной ситуации это не совсем так, поскольку при прокладывании маршрута осуществляется привязка длин кабелей к топологии местности. Естественно, при этом невозможно соблюсти строгое соответствие потерь на участке усилению, поэтому усилитель может кроме потерь своего участка частично компенсировать потери соседних участков.

Разработка участков распределительной сети выполняется на основе имеющихся в техническом задании проекта предполагаемых маршрутов и трасс прокладки кабеля. Требования технического задания конкретизируются и уточняются. Определяются точки расположения усилительного оборудования, точки включения пассивных приборов.

На этом этапе выполняется основная часть расчетов, в ходе которых определяются и корректируются протяженность усилительного участка, уровни сигналов в кабеле, длины соединительных кабелей, места расположения и параметры ответвителей, направленных ответвителей и эквалайзеров. Многое при этом зависит от предполагаемого разработчиком расположения сервисных точек вдоль маршрута участка, которые потребуются в данной системе. Необходимо сделать множество оценок вносимых потерь для выбора параметров ответвителей и направленных ответвителей. В основном эти оценки требуют проведения серий повторяющихся арифметических вычислений и анализа полученных результатов. Однообразный вычислительный процесс на этом этапе можно облегчить с помощью специального программного обеспечения, поставляемого сейчас многими разработчиками, однако, понимать процесс прокладывания системы необходимо. Расчет усилительного участка является наиболее ответственным этапом проектирования системы.

Результатом этого процесса является оформление проекта системы в виде чертежей и подробных схем с прилагаемыми расчетами характеристик системы, на основе которых затем составляется технико-экономическое обоснование проекта, проектная смета, список требуемого оборудования и материалов и другая проектная документация. Впоследствии по этим чертежам выполняется физическое прокладывание кабеля и установка оборудования. Кроме того, обеспечивается питание системы электроэнергией, окончательно выбирается расположение источников питания. На этом этапе можно не учитывать спецификации по возвратным потерям, механические свойства оборудования, а предположить, что они уже определены при первоначальном выборе оборудования конкретного производителя. Необходимо рассматривать только потери передачи и усиление.

Результаты расчетов удобно представлять в виде таблиц, позволяющих систематизировать расчет и существенно упростить анализ результатов, что особенно важно при проектировании большой системы, когда требуется сделать много однообразных вычислений. Таблица наглядно отображает весь процесс расчета и влияние каждого прибора или отрезка кабеля в отдельности на показатели системы, что дает представление о том, как менялся уровень сигнала при прохождении через элементы системы. Сведение данных в таблицу упрощает проверку всего процесса вычислений и обнаружение ошибок. Кроме того, если необходимо перепроектировать какой-либо отрезок, изменив на нем параметры ответвителя или кабеля, облегчается пересчет результатов. Поэтому здесь и во всех последующих главах будем представлять данные именно таким образом.

Для получения быстрой приблизительной оценки можно выполнить расчет потерь и усиления для верхней частоты широкополосной системы, поскольку эта частота представляет наихудший случай по потерям передачи. Однако, полный расчет участка широкополосной системы должен содержать расчет всех параметров по крайней мере для двух частот полосы, находящихся на ее границах.

Когда система уже спроектирована и построена, обслуживающий персонал часто сталкивается с необходимостью расширения кабельной сети или включения дополнительной нагрузки, поэтому разработчик, как правило, предусматривает такую возможность.

Методика расчета усилительного участка неизменна для любой частоты узкополосной или широкополосной системы. Понятие "широкополосности" до некоторой степени условно. Полоса современных систем КТВ составляет около 900 МГц и системы с полосой 500 МГц в настоящее время тоже нужно считать узкополосными. В общем, широкополосную систему можно определить как систему, в которой значительно сказываются частотные свойства ее элементов. Верхнюю граничную частоту узкополосной системы передачи можно грубо оценить значением 300 МГц. При большей ширине полосы систему нужно рассматривать как широкополосную и все расчеты уже следует выполнять для двух частот полосы – нижней и верхней, поскольку характеристики системы на этих частотах будут сильно различаться (в основном вследствие частотных свойств коаксиального кабеля). Соответственно, и проверку на соответствие рассчитываемых уровней требуемым значениям также нужно выполнять для двух частот. Например, для системы с верхней частотой полосы 900 МГц расчет следует выполнить для нижней частоты спектра 50 МГц и верхней частоты

Глава 15. Проектирование усилительного участка

спектра 900 МГц. При проектировании широкополосных систем следует учитывать, что спецификация будет ограничивать разность уровней передачи (т.е. наклон спектра) между двумя частотами на выходе ответвителя.

На рис. 15.3 показан один усилительный участок кабельной сети с тремя расположенными на нем ответвителями. Допустим, что длины соединительных кабелей между ответвителями должны составлять 20, 120 и 100 м. Предположим, что все ответвители являются устройствами с двумя выходными портами (т.е. они способны обслуживать только по одному ответвлению). Используем параметры ответвителей, представленные в табл. 15.1.

Допустим, что спецификации требуют, чтобы минимальный уровень на входе каждого ответвления был равен +10 дБ·мВ. Потери в кабеле будем считать равными 5 дБ на 100 м.

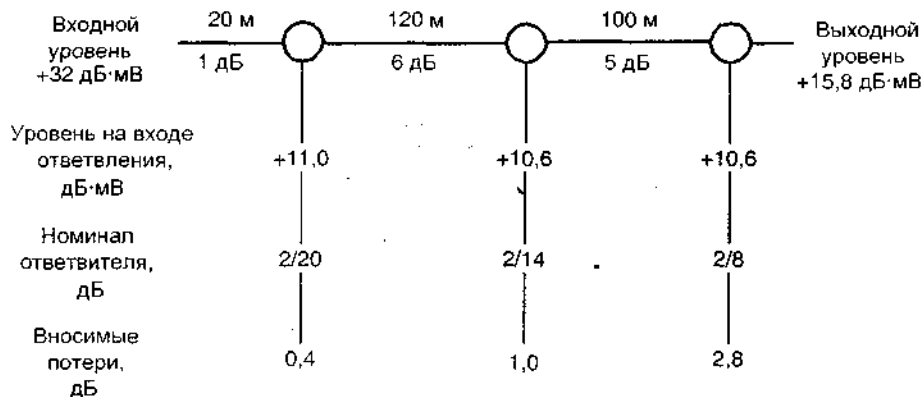


Рис. 15.3. Усилительный участок (входной уровень +32 дБ·мВ)

Рассчитаем этот участок для входного уровня сигнала +32 дБ·мВ. При данном уровне на входе первого ответвителя сигнал после прохождения через первый отрезок кабеля длиной 20 м с потерями 1 дБ будет иметь уровень +31 дБ·мВ. Чтобы обеспечить не менее +10 дБ·мВ на входе ответвления, используем ответвитель с двумя выходными портами с номиналом 20 дБ. Уровень на входе ответвления будет на 20 дБ ниже уровня +31 дБ·мВ, т.е. +11 дБ·мВ, как и показано на рисунке. Учитывая, что вносимые потери ответвителя на проход составляют 0,4 дБ, получим уровень прошедшего через ответвитель сигнала в основном кабеле +30,6 дБ·мВ. После прохождения через следующий отрезок кабеля длиной 120 м сигнал потеряет еще 6 дБ, и его уровень на входе второго ответвителя будет +24,6 дБ·мВ. Используемый здесь ответвитель с двумя портами на 14 дБ создает на входе своего ответвления уровень +10,6 дБ·мВ, который находится в пределах спецификации. Этот ответвитель имеет проходные потери 1 дБ, поэтому уровень сигнала на его выходе в основном кабеле равен +23,6 дБ·мВ. На отрезке кабельного участка между вторым и третьим ответвителями, длина которого 100 м, потери передачи составляют 5 дБ, следовательно, на входе третьего ответвителя уровень сигнала будет равен +18,6 дБ·мВ. Этот ответвитель на 8 дБ обеспечивает на входе своего ответвления уровень +10,6 дБ·мВ и вносит проходные потери в основном кабеле 2,8 дБ, поэтому сигнал на его выходе имеет уровень +15,8 дБ·мВ.

15.2. Методика проектирования

Составим таблицу потерь и выходных уровней, каждый из которых является входным уровнем для следующего элемента в рассматриваемом кабельном участке. Общие потери передачи, вносимые ответвителями на проходе составляют 4,2 дБ, что показано на рис. 15.3 и отражено в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Потери и уровни передачи (для рис. 15.3)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ	Уровень в основном кабеле, дБ·мВ	Уровень на входе ответвления, дБ·мВ
Усилитель		+32,0	
Кабель 20 м	1,0	+31,0	
Ответвитель 2/20	0,4	+30,6	+11,0
Кабель 120 м	6,0	+24,6	
Ответвитель 2/14	1,0	+23,6	+10,6
Кабель 100 м	5,0	+18,6	
Ответвитель 2/8	2,8	+15,8	+10,6

Покажем возможные ситуации ограничений по ответвляемой нагрузке на этом участке при трех различных уровнях входного сигнала: низком, среднем и высоком (условные значения). Расчеты выполним для двух частот полосы. Предположим, что спектр передачи на входе усилительного участка имеет наклон 6 дБ, т.е. входной уровень на частоте 900 МГц выше на 6 дБ, чем на частоте 50 МГц, а допустимый наклон на входе ответвления составляет 10 дБ. Низкий входной уровень участка примем равным +32 дБ·мВ на частоте 900 МГц и +26 дБ·мВ на частоте 50 МГц.

Расчетные параметры усилительного участка приведены в табл. 15.3. Общие вносимые ответвителями потери составляют 4,1 дБ на 50 МГц и 5,6 дБ на 900 МГц. Как выяснилось, после третьего отрезка соединительного кабеля потери передачи на 900 МГц оказались таковы, что уровень передачи в этой точке стал ниже минимального значения +10 дБ·мВ и включить третий ответвитель на этом участке невозможно.

Таблица 15.3.

Потери и уровни передачи при низком входном уровне

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле, дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			26,0	32,0		
Кабель 20 м	0,52	1,85	25,5	30,2		
Ответвитель 2/14	0,70	1,30	24,8	28,9	10,9	14,2

Глава 15. Проектирование усилительного участка

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле, дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Кабель 120 м	3,12	11,1	21,7	17,8		
Ответвитель 2/7	3,40	4,30	18,3	13,5	15,3	10,8
Кабель 100 м	2,60	9,25	15,7	4,25		
–	Уровень сигнала < +10 дБ·мВ					

На этом расчет участка прекращается, поскольку и обеспечить обслужива-ние всех трех точек при данном входном уровне не удастся. Причем, дело здесь не во вносимых ответвителями потерях, а именно в низком входном уровне участка (можно убедиться, что и при выборе ответвителей с другими параметрами продолжить участок невозможно).

Теперь повторим весь описанный процесс при более высоком (среднем) входном уровне участка: +40 дБ·мВ на частоте 900 МГц и +34 дБ·мВ на частоте 50 МГц, т.е. на 8 дБ выше, чем в предыдущем примере. Результаты представ-лены в табл. 15.4.

Таблица 15.4

Потери и уровни передачи при среднем входном уровне

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			34,0	40,0		
Кабель 20 м	0,52	1,85	33,5	38,2		
Ответвитель 2/23	0,30	0,80	33,2	37,4	10,2	14,2
Кабель 120 м	3,12	11,1	30,1	26,3		
Ответвитель 2/14	0,70	1,30	29,4	25,0	15,5	10,3
Кабель 100 м	2,60	9,25	26,8	15,8		
Ответвитель 2/4	–	–	–	–	23,4	12,1

Обратите внимание, что здесь использовались уже другие ответвители с другими номиналами. Потери, вносимые ответвителями, составляют теперь 1,0 дБ на 50 МГц и 2,1 дБ на 900 МГц, что меньше по сравнению с предыдущим примером. Как видно из таблицы эффективность использования ответвителей повысилась за счет повышения уровней передачи. Хотя теперь участок способен обеспечивать адекватные уровни сигналов на входах всех ответвлений (+10 дБ·мВ или выше), т.е. обслуживать все три точки, то в качестве последнего ответвителя используется терминирующий ответвитель и, следовательно, сеть

15.2. Методика проектирования

не может быть продлена за пределы третьей обслуживаемой точки, что и показано в таблице. Далее становится неважным, каковы накопленные вносимые потери, так как система не может быть расширена.

Посмотрим, что произойдет, если увеличить уровень сигнала на входе кабельного участка до +48 дБ·мВ на частоте 900 МГц, т.е. до максимального значения (табл. 15.5). При таком входном уровне можно установить все три ответвителя и на входах всех ответвлений уровни сигнала будут выше +10 дБ·мВ. Вносимые двумя первыми ответвителями потери передачи составляют всего лишь 0,6 дБ на 50 МГц и 1,5 дБ на 900 МГц. Общие вносимые ответвителями потери составляют 1,7 дБ на 50 МГц и 3,8 дБ на 900 МГц. Таким образом, спецификации в этом смысле соблюдены, но уровни сигналов на входе третьего ответвления равны +23,5 дБ·мВ и +12,4 дБ·мВ на частотах 50 МГц и 900 МГц соответственно. Эти значения недопустимы, поскольку по спецификации наклон уровней на входе ответвления не должен превышать 10 дБ, а он в данном случае составляет 11,1 дБ. В основном кабеле, на выходе участка разность уровней тоже стала недопустимо большой (12 дБ). Но с другой стороны, здесь появилась возможность расширения системы за пределы третьего ответвителя.

Таблица 15.5

Потери и уровни передачи при высоком входном уровне

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			42,0	48,0		
Кабель 20 м	0,52	1,85	41,5	46,2		
Ответвитель 2/23	0,30	0,70	41,2	45,3	12,1	15,2
Кабель 120 м	3,12	11,1	38,1	34,4		
Ответвитель 2/14	0,30	0,80	37,8	33,6	14,8	10,4
Кабель 100 м	2,60	9,25	35,2	24,4		
Ответвитель 2/4	1,10	2,30	34,1	22,1	23,5	12,4

Проанализировав результаты этих примеров, можно сделать несколько полезных выводов. Во-первых, получается, что более высокий уровень передачи позволяет использовать ответвители с низкими вносимыми потерями. Это выгодно в протяженных системах, так как потери передачи (в кабеле и вносимые приборами) диктуют параметры усилительного участка. Благодаря этому можно использовать в области обслуживания меньше усилителей при том же количестве включенных ответвителей или, наоборот, разместить больше ответвителей при данной длине усилительного участка. Это правило определяет важную характеристику распределительной кабельной системы – эффективность ответвления сигнала или эффективность использования ответвителей. Иначе его можно сформулировать так: эффективность использования ответвителей тем больше, чем выше уровни передачи. Если конкретную систему можно характеризовать как включающую множество длинных кабельных маршрутов и ответвители разнесены на большие расстояния, то разработчик может допустить

Глава 15. Проектирование усилительного участка

меньшую эффективность ответвлений при более низких уровнях передачи. Этот прием используется в системах среднего и малого масштаба в районах с низкой абонентской нагрузкой. Соотношение эффективности использования ответвителей и протяженности участка поясняет рис. 15.4. Здесь сравнивается эффективность ответвителей при различных уровнях передачи и показано возможное количество ответвителей для каждого входного уровня передачи. Видно, как уменьшается протяженность участка при уменьшении входного уровня.

Ответвители для построения участка широкополосной системы нужно выбирать так, чтобы на обеих частотах рассчитываемые параметры участка оставались в пределах нормы. Особых трудностей это не вызывает, поскольку ответвители имеют почти ровную частотную характеристику с небольшой разностью вносимых потерь на между сигналами нижней и верхней частоты.

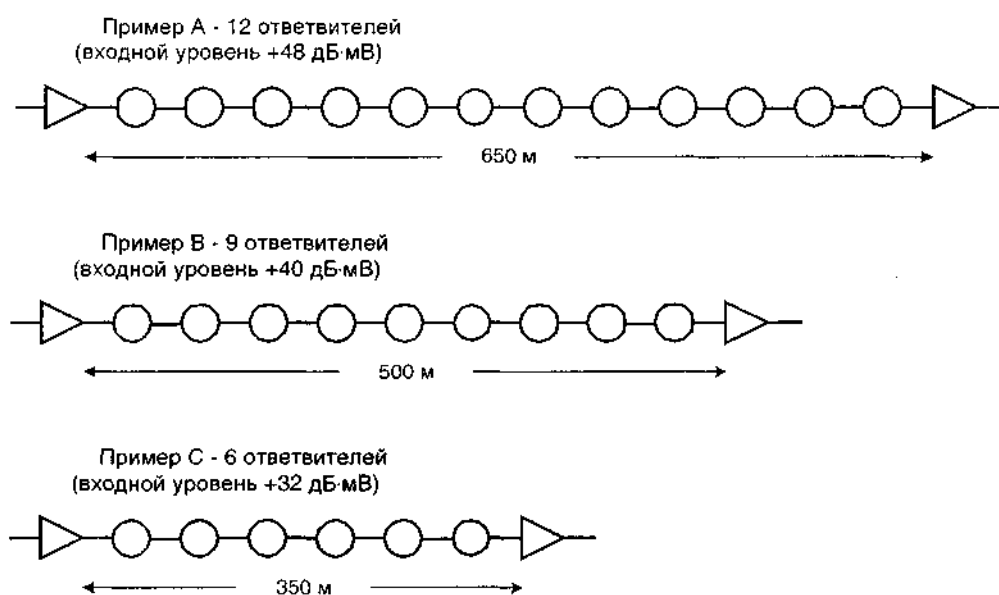


Рис. 15.4. Эффективность ответвления сигнала

Заметим, что во всех примерах уровень передачи на входе ответвления почти всегда превышал установленное спецификацией значение +10 дБ-мВ. Ранее, при рассмотрении шума и интермодуляции, нами было выяснено, какими нежелательными эффектами сопровождается повышение уровней передачи. Однако инженерная практика проектирования представляет собою серию компромиссов, поэтому разработчик должен найти оптимальное соотношение между эффективностью ответвителей, сделав ее как можно более высокой, и возрастающими интермодуляционными искажениями как следствием повышения выходного уровня усилителя.

Из приведенных примеров можно сделать и еще один важный вывод. Ввиду роста потерь на высоких частотах наклон спектра на входе очередного ответвления может выйти за пределы допустимого. Поэтому, если не хотим нарушить требования к величине наклона, необходима промежуточная коррекция частот-

ной характеристики системы внутри усилительного участка, иначе в конечных точках подключения абонентских терминалов получим слишком большой диапазон отклонений уровня сигнала. В следующем параграфе рассмотрим промежуточное выравнивание более подробно.

15.3. Использование промежуточного эквалайзера

Чтобы выяснить, как действует механизм промежуточного выравнивания, достаточно дать ответ на вопрос, каков диапазон допустимых отклонений уровня сигнала в выходной точке ответвления.

На рис. 15.5 показан способ подключения ответвлений к участку с помощью ответвителей, аналогичный тому, что уже был показан ранее для широкополосной системы, но здесь на втором отрезке соединительного кабеля установлен промежуточный (или встроенный) эквалайзер, который, как известно, является пассивным прибором. Эквалайзер вносит потери 1 дБ на частоте 900 МГц и 6 дБ на частоте 50 МГц.

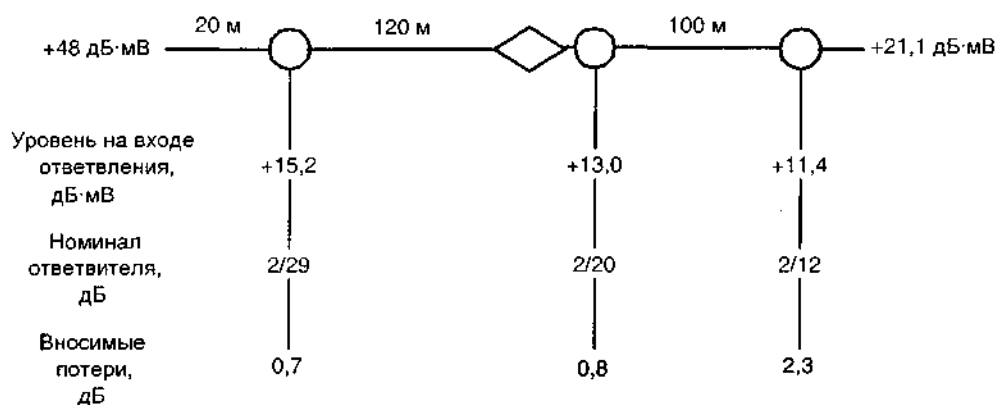


Рис. 15.5. Промежуточное выравнивание

Проведя аналогичные расчеты, увидим, что все потери и уровни передачи вплоть до той точки, в которую включили эквалайзер остались прежними, а после этой точки они изменились и вместе с ними изменились параметры ответвителей. Результаты представлены в табл. 15.6. Если сравним данные этой и предыдущей таблиц, то обнаружим, что эквалайзер создает сразу два преимущества. Во-первых, разность уровней на выходе участка (в основном кабеле), которая в предыдущем примере составляла $34,1 \text{ дБ} - 22,1 \text{ дБ} = 12 \text{ дБ}$, сейчас составляет только $6,9 \text{ дБ}$ ($28,0 - 21,1$). Во-вторых, уменьшилась разность уровней на входах ответвлений, что и было главной целью выравнивания. Раньше она составляла $23,5 - 12,4 = 11,1 \text{ дБ}$, а теперь $17,4 - 11,4 = 6,0 \text{ дБ}$, что укладывается в допустимый диапазон.

Использование промежуточных или встроенных эквалайзеров приводит уровни сигналов к нормативным значениям, но одновременно увеличивает затраты на создание участка (прибавляется стоимость эквалайзеров и разъемов для их подключения). Однако их использование не является обязательным. Если сеть содержит множество ответвителей, которые соединены короткими

Глава 15. Проектирование усилительного участка

отрезками кабеля, то встроенные эквалайзеры возможно не понадобятся, даже при полосе передачи 900 МГц. Такая ситуация часто встречается в городских кабельных системах, где высока плотность абонентской нагрузки и ответвители расположены близко друг к другу.

Таблица 15.6

Потери и уровни передачи (для рис. 15.5)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			42,0	48,0		
Кабель 20 м	0,52	1,85	41,5	46,2		
Ответвитель 2/29	0,30	0,70	41,2	45,3	12,1	15,2
Кабель 120 м	3,12	11,1	38,1	34,4		
Эквалайзер	6,00	1,00	32,1	33,4		
Ответвитель 2/20	0,40	0,80	31,7	32,6	12,6	13,0
Кабель 100 м	2,60	9,25	29,1	23,4		
Ответвитель 2/12	1,10	2,30	28,0	21,1	17,4	11,4

Линейное искажение спектра передачи становится более серьезным в системах с более широкой полосой частот, поэтому и расчет участка широкополосной системы несколько сложнее, хотя применяется одна и та же методика. На вопрос об использовании на участке промежуточного эквалайзера нельзя ответить однозначно, поскольку в каждом случае это решается на основе получаемых результатов. Нельзя, например, утверждать, что использование встроенных эквалайзеров всегда необходимо для системы с полосой 900 МГц. В некоторых случаях спецификация системы устанавливает такой допустимый диапазон отклонений уровня, при котором становится возможным не использовать промежуточные эквалайзеры и, тем самым, сделать систему более экономичной.

15.4. Расчет нагрузки усилительного участка

Теперь подробнее рассмотрим порядок выбора ответвителей и расчета уровней передачи при проектировании участка. В табл. 15.7 даны подробные параметры некоторых ответвителей, включая потери на ответвлении, вносимые потери и такой важный параметр как развязка между выходами. На протяжении магистрального участка устанавливаются ответвители требуемых номиналов, которые рассчитываются на основе этих параметров, как и в предыдущем параграфе. При этом необходимо добиться наибольшей эффективности использования ответвителей. В отличие от ранее рассмотренных примеров реальные участки распределительной сети могут включать гораздо большее количество ответвителей. Расчеты будут сделаны отдельно для узкополосной и широкополосной системы.

15.4. Расчет нагрузки усилительного участка

Таблица 15.7

Параметры магистральных ответвителей

Число выходов	Потери ответвления, дБ	Вносимые потери, дБ	Развязка, дБ
2Т	4	–	–
2	8	2,8	23
2	11	1,5	26
2	14	1,0	29
2	17	0,7	32
2	20	0,6	35
2	23	0,4	38
2	26	0,4	41
2	29	0,4	44
2	32	0,4	47
4Т	7	–	–
4	11	2,8	26
4	14	1,7	29
4	17	1,0	32
4	20	0,7	35
4	23	0,6	38
4	26	0,4	41
4	29	0,4	44
4	32	0,4	47
4	35	0,4	50

На рис. 15.6 показан усилительный участок некоторого уровня распределительной сети с множеством сервисных ответвлений подключенных к нему в разных точках с помощью ответвителей. Этот участок может быть участком магистральной сети между двумя магистральными усилителями. Тогда ответвления подключаются к участку с помощью магистральных ответвителей и образуют распределительную сеть, обслуживающую дома. Это также может быть стояковый участок (ветвь) домовой распределительной сети между домовым усилителем и конечной обслуживаемой точкой. Тогда к участку подключаются абонентские ответвления с помощью абонентских ответвителей. Будем рассматривать этот участок как магистральный.

Глава 15. Проектирование усилительного участка

Допустим, выбранный магистральный усилитель работает при входном уровне $+17$ дБ·мВ и выходном уровне $+48$ дБ·мВ. Допустим, что для интересующей нас частоты передачи потери в магистральном кабеле составляют 4 дБ на 100 м, а уровень на входе каждого магистрального ответвления распределительной сети должен быть не менее $+10$ дБ·мВ. К выходу каждого магистрального ответвления подключается домовый усилитель и для его нормальной работы этого уровня должно быть достаточно. Предположим, что это так и есть. Вместо входного уровня ответвления могли бы определить требуемый уровень на входе домового усилителя и выполнить все расчеты исходя из него, только в таком случае необходимо было бы учесть еще потери в самом ответвительном кабеле, который обычно имеет другой тип (с другим, более высоким, значением потерь).

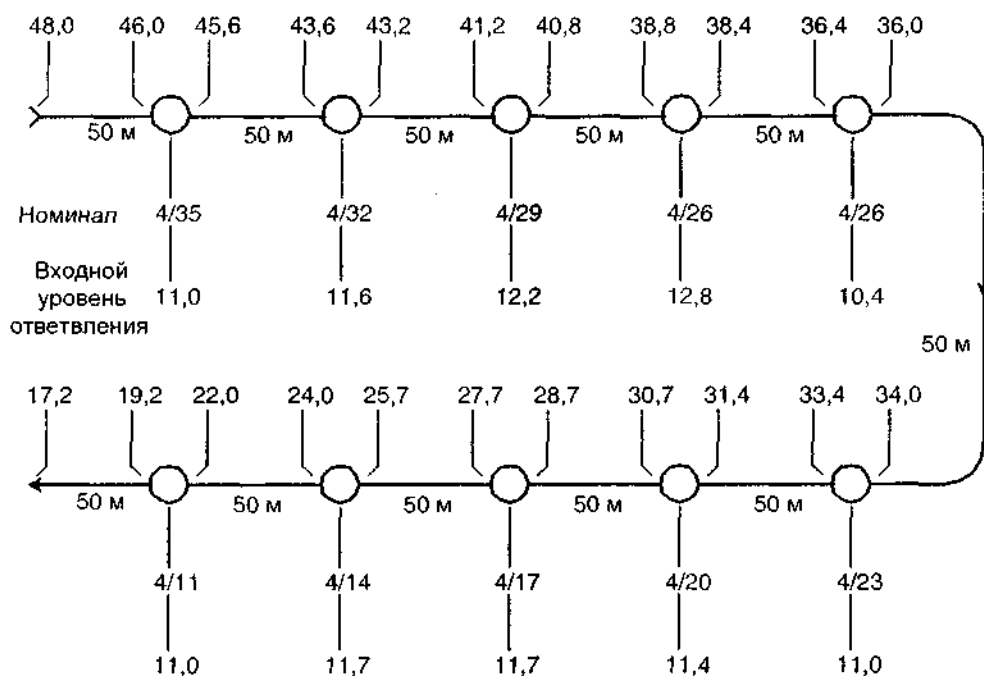


Рис. 15.6. Расчет параметров участка

На входе первого ответвителя уровень составляет $+46$ дБ·мВ, как показано на рисунке. Следовательно, ответвитель с четырьмя выходными портами и номиналом 35 дБ будет создавать на входе ответвления уровень $+11$ дБ·мВ. Вносимые потери для этого ответвителя в таблице определены значением 0,4 дБ, поэтому в основном кабеле уровень сигнала, прошедшего через ответвитель будет равен 45,6 дБ·мВ, как и показано на рисунке. При данных потерях в основном кабеле 2 дБ уровень сигнала на входе второго ответвителя будет равен 43,6 дБ. Используемый здесь ответвитель на 32 дБ будет создавать на входе своего ответвления уровень $+11,6$ дБ·мВ. С учетом вносимых этим ответвителем потерь на проход 0,4 дБ, уровень сигнала на входе следующего отрезка основного кабеля будет равен $+43,2$ дБ·мВ, что и показано на рисунке. Результаты представлены в табл. 15.8.

15.4. Расчет нагрузки усилительного участка

Таблица 15.8

Потери и уровни передачи (для рис. 15.6)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ	Уровень в основном кабеле, дБ·мВ	Уровень на входе ответвления, дБ·мВ
Усилитель		48,0	
Кабель 50 м	2,0	46,0	
Ответвитель 4/35	0,4	45,6	11,0
Кабель 50 м	2,0	43,6	
Ответвитель 4/32	0,4	43,2	11,6
Кабель 50 м	2,0	41,2	
Ответвитель 4/29	0,4	40,8	12,2
Кабель 50 м	2,0	38,8	
Ответвитель 4/26	0,4	38,4	12,8
Кабель 50 м	2,0	36,4	
Ответвитель 4/26	0,4	36,0	10,4
Кабель 50 м	2,0	34,0	
Ответвитель 4/23	0,6	33,4	11,0
Кабель 50 м	2,0	31,4	
Ответвитель 4/20	0,7	30,7	11,4
Кабель 50 м	2,0	28,7	
Ответвитель 4/17	1,0	27,7	11,7
Кабель 50 м	2,0	25,7	
Ответвитель 4/14	1,7	24,0	11,7
Кабель 50 м	2,0	22,0	
Ответвитель 4/11	2,8	19,2	11,0
Кабель 50 м	2,0	17,2	

Как можно видеть по рис. 15.6, выбор, например, пятого ответвителя соответствует требованиям спецификации. Уровень на его входе равен +36.4 дБ·мВ. Для создания заданного спецификацией уровня на входе ответвления +10 дБ·мВ или более используем ответвитель с четырьмя портами на 26 дБ (4/26), что обеспечит входной уровень ответвления +10.4 дБ·мВ. В следующей точке устанавливаем ответвитель с номиналом 4/23. Это процесс продолжается, пока уровень передачи не станет слишком низким для ответвления, т.е. когда невозможно будет подобрать такой ответвитель, который обеспечил бы по крайней мере +10 дБ·мВ на входе очередного ответвления. Поскольку уровень сигнала в конечной точке основного кабеля равен +17.2 дБ·мВ, то даже при использовании ответвителя с наименьшим из имеющихся у нас номиналов 11 дБ на входе ответвления останется только +6.2 дБ·мВ, что не допускается специ-

Глава 15. Проектирование усилительного участка

фикацией. Следовательно, в этой точке следует установить усилитель для того, чтобы продолжить основной кабельный маршрут, т.е. начать следующий усилительный участок или установить терминатор.

Очевидно, что система не может быть эффективно спроектирована из усилительных участков различных произвольно выбранных длин. Длины участков должны быть стандартными и рассчитываться заранее, исходя из известной протяженности маршрута от головной станции или другой точки происхождения сигнала до самой удаленной обслуживаемой точки. Кабельные маршруты, расходящиеся от точек включения делителей и направленных ответвителей, должны проектироваться поочередно в том порядке, как они располагаются в системе, а не после прокладки основного кабельного маршрута, потому что в противном случае уровень сигнала на некоторых маршрутах может оказаться недостаточным. В этом примере длины кабельных отрезков были взяты произвольно, а при проектировании реальной системы они задаются картами сетевых маршрутов. Приведенный здесь выбор ответвителей не является единственным. Возможны различные комбинации ответвителей в зависимости от того, какую распределительную структуру нужно построить, т.е. выбор ответвителей осуществляется исходя из потребностей в них в данной точке. Заметим, что при проектировании широкополосной системы, какой является система КТВ с полосой частот до 862 МГц и тем более до 1000 МГц, необходимо проведение серии расчетов для двух частот передачи (нижней и верхней), причем нужно будет учитывать величину наклона спектра передачи. В остальном расчет будет отличаться только значениями затухания в кабеле.

Продедаем тот же процесс для широкополосной системы с верхней частотой передачи 900 МГц. Предположим, что уровень на входе каждого магистрального усилителя должен быть равен +17 дБ·мВ на 900 МГц (наихудший случай), а на выходе +47 дБ·мВ на 900 МГц и +37 дБ·мВ на 50 МГц. Предположим, что минимальный уровень сигнала на входе ответвления может составлять +7 дБ·мВ, а также установим условие, что разность между уровнями передачи на частотах 900 МГц и 50 МГц не должна превышать 10 дБ на входе ответвления. Потери в кабеле положим равными 1,6 дБ на 100 м на 50 МГц и 5,6 дБ на 100 м на 900 МГц.

Нет необходимости приводить дополнительный пояснительный рисунок, который был бы аналогичен рис. 15.6. Результаты представлены в табл. 15.9.

Таблица 15.9

Потери и уровни передачи (для рис. 15.6)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле, дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			37,0	47,0		
Кабель 50 м	0,78	2,80	36,2	44,2		
Ответвитель 4/26	0,30	0,75	35,9	43,5	10,0	17,7
Кабель 50 м	0,78	2,80	35,1	40,7		

15.4. Расчет нагрузки усилительного участка

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле, дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Ответвитель 4/26	0,30	0,75	34,8	40,0	8,9	13,5
Кабель 50 м	0,78	2,80	34,0	37,2		
Ответвитель 4/23	0,30	1,30	33,7	35,9	10,3	13,1
Кабель 50 м	0,78	2,80	32,9	33,1		
Ответвитель 4/23	0,30	1,30	32,6	31,8	9,5	9,0
Кабель 50 м	0,78	2,80	31,8	29,0		
Ответвитель 4/20	0,60	1,10	31,2	27,9	11,7	8,8
Кабель 50 м	0,78	2,80	30,4	25,1		
Ответвитель 4/17	0,90	1,60	29,5	23,5	13,2	8,3
Кабель 50 м	0,78	2,80	28,7	20,7		
Ответвитель 4/12	2,30	3,00	26,4	17,7	16,6	7,9
Кабель 11 м	0,27	0,64	26,1	17,1		

Заметим, что и теперь ни на одном из входов ответвлений, уровень сигнала не становится меньше определенного спецификацией минимального значения +7 дБ·мВ (наименьшее значение на выходе последнего ответвителя составляет 7,9 дБ·мВ), а разность между уровнями крайних частот передачи на последнем ответвлении оказалась равна только 7,7 дБ (16,6 дБ·мВ – 7,9 дБ·мВ = 7,7 дБ), тогда как спецификация допускает рост этой разности до 10 дБ. Чтобы соблюдать спецификации магистрального усилителя, необходимо обеспечить на его входе уровень +17 дБ·мВ. Так как после включения седьмого ответвителя 4/12 уровень уже снизился до 17,7 дБ·мВ, то нельзя включить в этот усилительный участок еще один ответвитель. Поэтому после седьмого ответвителя нужно включить последний на этом участке кабельный отрезок длиной всего 11 м, в котором потери сигнала составят 0,6 дБ (на 900 МГц), а уровень упадет до значения +17,1 дБ·мВ. Следовательно, на расстоянии 11 м от последнего ответвителя следует включить усилитель данного участка и протяженность участка, таким образом, составит 361 м.

В этом примере на усилительном участке не использовался промежуточный эквалайзер благодаря тому, что на выходе усилителя предыдущего участка был создан значительный наклон спектра передачи (разность уровней передачи на крайних частотах в 10 дБ). Чтобы показать необходимость включения в участок эквалайзера, будем считать, что все требования остаются прежними, кроме величины наклона, которую теперь примем равной только 6 дБ, создавая на выходе предыдущего усилителя уровень +47 дБ·мВ на 900 МГц и +41 дБ·мВ на 50 МГц. Для этих условий результаты расчета участка представлены в табл. 15.10.

Потери и уровни передачи (с эквалайзером)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ		Уровень в основном кабеле, дБ·мВ		Уровень на входе ответвления, дБ·мВ	
	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц	50 МГц	900 МГц
Усилитель			41,0	47,0		
Кабель 50 м	0,78	2,80	40,2	44,2		
Ответвитель 4/29	0,30	0,40	39,9	43,8	10,6	14,0
Кабель 50 м	0,78	2,80	39,1	41,0		
Ответвитель 4/29	0,30	0,40	38,8	40,6	9,5	10,8
Кабель 50 м	0,78	2,80	38,0	37,8		
Ответвитель 4/26	0,30	0,75	37,7	37,0	11,8	11,3
Кабель 50 м	0,78	2,80	36,9	34,2		
Ответвитель 4/26	0,30	0,75	36,6	33,5	10,7	7,7
Кабель 50 м	0,78	2,80	35,8	30,7		
Ответвитель 4/23	0,30	1,30	35,5	29,4	12,4	7,9
Кабель 50 м	0,78	2,80	34,7	26,6		
Ответвитель 4/17	0,90	1,60	33,8	25,0	17,5	9,8
Кабель 50 м	0,78	2,80	33,0	22,2		
Ответвитель 4/14	1,50	2,00	31,5	20,2	19,2	8,0
Эквалайзер	6,00	1,00	27,0	21,2		
Ответвитель 4/12	2,30	3,00	24,7	18,2	14,9	8,4
Кабель 21 м	0,33	1,18	24,4	17,0		

Как видно из этой таблицы, спецификации участка до точки включения седьмого ответвителя соблюдались, поскольку минимальный уровень на входе ответвления оказался равным +7,7 дБ·мВ при допустимом +7 дБ·мВ и наклон не превышал 10 дБ. Но далее, если попытаться использовать седьмой ответвитель с параметрами 4/14, то на его выходе разность уровней на частотах 50 МГц и 900 МГц составила бы 11,2 дБ (19,2 – 8,0), т.е. превысила бы допустимые 10 дБ (результаты, относящиеся к ответвителю 4/14, подчеркнуты, чтобы показать, что спецификация была бы нарушена). Поэтому после седьмого отрезка кабеля на данном усилительном участке включаем не ответвитель 4/14, а эквалайзер, выравнивающий наклон уровней передачи в кабеле до 5,8 дБ (27 дБ·мВ – 21,2 дБ·мВ). После эквалайзера в качестве седьмого ответвителя

15.4. Расчет нагрузки усилительного участка

можно поставить только один ответвитель с номиналом 4/12, потому что уровня сигнала не хватит на большее количество ответвлений. Аналогично предыдущему случаю к последнему ответвителю подключен короткий отрезок кабеля длиной 21 м, доводящий уровень сигнала до +17 дБ·мВ (900 МГц). На расстоянии 21 м от последнего ответвителя будет включен усилитель. Протяженность этого усилительного участка между предыдущим и следующим усилителями теперь будет равна 371 м. Таким образом, эквалайзер в этом случае был необходим, поскольку предыдущий усилитель обеспечивал недостаточно сильный наклон спектра передачи.

Таким образом, выстраивание ответвителей на участке кабельной сети делается следующим образом: проходя вдоль основного кабеля, разработчик проверяет, не выходит ли уровень сигнала в точке установки очередного ответвителя за рамки требуемого. Если уровень не соответствует требуемому значению (т.е. меньше его), то последний ответвитель следует исключить из сети, прекратив на этом проведение участка, или выбрать ответвитель с другими номиналами. Если уровень еще находится в допустимых пределах (т.е. больше требуемого), можно попробовать установить следующий ответвитель и так далее.

Тот же принцип применяется в случае, если рассматриваемый участок (рис. 15.6) является участком домовой распределительной сети. Выбор ответвителей, теперь уже абонентских, выполняется по принципу достаточности уровня сигнала для включения очередного ответвителя. Различие только в том, что при проектировании участка домовой сети необходимо ориентироваться не на требуемое значение уровня на входе магистрального ответвления, которое здесь было принято равным +10дБ·мВ, а на требуемое значение уровня на входе абонентского ответвления. Вместо уровней магистрального усилителя теперь будут учитываться уровни домового усилителя. Если уровня сигнала оказывается недостаточно для подключения нужного количества абонентов, то разработчик возвращается к магистральному уровню сети, чтобы повысить уровень сигнала на входе магистрального ответвления, или принимает другое решение, позволяющее уменьшить ответвительную нагрузку. Структура домовой сети была приведена в первой главе. Сигнал с выхода домового усилителя, как правило, делится по нескольким домовым участкам, которые прокладывают по стоякам многоподъездного дома, проходя через все его этажи. Протяженность участков заранее известна и определяется высотой дома. В окончании участка домовой сети устанавливается не усилитель, как в магистрали, а терминирующий ответвитель или просто терминатор-заглушка. Домовая сеть обычно не требует использования эквалайзеров. Параметры ответвителей, разумеется, будут другими.

15.5. Учет длины ответвлений

Выбор ответвителей на участке распределительной сети всегда диктуется текущим значением уровня передачи в тех точках участка, к которым подключаются сервисные ответвления. Входной уровень ответвления нормируется и, вычитая из текущего уровня сигнала на участке потери в ответвителе, выбранном для подключения очередного ответвления, разработчик сравнивает полученный уровень на выходе ответвителя с нормативным значением входного уровня ответвления. В предыдущем параграфе было произвольно установлено, что входной уровень ответвления должен быть не ниже +10 дБ·мВ. В дейст-

Глава 15. Проектирование усилительного участка

вительности он однозначно определяется длиной кабеля ответвления, величиной потерь в нем и требуемым уровнем сигнала на выходе ответвления, который, в свою очередь, зависит от типа участка. Так, для магистрального участка выходной уровень ответвления в конечном итоге определяется длиной кабеля магистрального ответвления и входным уровнем домового усилителя. Для домового участка он зависит от длины абонентского ответвления и нормативного уровня сигнала на абонентской розетке.

Уровень сигнала на абонентской розетке определяется стандартами, разработанными для кабельных сетей, а входной уровень домового усилителя определяется его спецификацией. Поскольку то и другое фиксировано, критичным параметром является длина (и потери) кабеля ответвления. Как правило, по всей области обслуживания длины ответвлений невелики (не более 30 м) и примерно одинаковы. В этом случае спроектировать участок с соблюдением спецификаций не составляет труда. Но иногда оказывается, что необходима прокладка таких сервисных ответвлений, длина которых превышает среднюю длину ответвления. Например, это может потребоваться в малонаселенных районах, когда в стороне от основного маршрута расположены отдельные абоненты или малые группы абонентов. Редкие случаи удаленного расположения отдельной сервисной точки встречаются также и в районах с высокой плотностью абонентов. Самым простым решением является увеличение протяженности распределительной сети с помощью радиального отвода кабеля или кабельного расширения, что снизит потери передачи за счет перенесения точки подачи сигнала ближе к дому абонента и обеспечит более высокий уровень сигнала для ответвления. В крайних случаях, когда и этого недостаточно, может потребоваться установка дополнительного усилителя в расширении. Иногда это решение может быть единственным, но поскольку стоимость усилителя в расчете на одного абонента достаточно велика, нужно рассмотреть и другие варианты.

Наиболее практичным подходом является пассивное снижение потерь в ответвлении с помощью кабеля большего размера с более низкими потерями. Например, необходимо создать подвесное абонентское ответвление длиной 150 м, уровень сигнала на выходе которого должен составлять +4 дБ·мВ. Допустим, что требование по уровню +4 дБ·мВ в окончании ответвления не удалось выполнить даже применяя кабель RG-11 с вспененным диэлектриком. Это требование можно выполнить с помощью кабеля серии 500 (½ дюйма), хотя для этого потребуются прокладка троса как при построении основной кабельной структуры. Теперь основная часть ответвления будет выполнено из ½-дюймового кабеля с низкими потерями, а из кабеля RG-6 или RG-11 будет выполнена только часть ответвления от последней опоры до дома абонента. Трудно установить ограничения для такой комбинированной конструкции, поскольку они диктуются тем, сколько кабеля RG-6 или RG-11 требуется в ответвлении. Очевидно, трудоемкость и материальные затраты этого способа окажутся довольно высокими, но в большинстве случаев они будут все-таки ниже, чем затраты на дополнительный усилитель, который, кроме того, требует питания и технического обслуживания.

Другим возможным решением является специальный выбор параметров ответвителей в процессе построения участка, при котором будет обеспечена подача в ответвительный кабель сигнала с более высоким уровнем (+10 дБ·мВ). В этом случае предполагается, что характеристики длинного ответвления были

определены до этапа планирования системы, и оказалось, что оно в действительности вносит избыточные потери.

Рассмотрим процесс выбора ответвителей с применением этой методики. Допустим, необходимо выбрать ответвитель, который обеспечит питание сервисного ответвления в той точке основной кабельной структуры, где уровень сигнала равен +24 дБ·мВ. Выберем ответвитель с номиналом 14 дБ, который означает, что уровни ответвляемых сигналов с выходного порта ответвителя будут на 14 дБ ниже уровней сигналов в основной кабеле на входе ответвителя. При данном уровне сигнала на входе этого ответвителя уровень на входе сервисного ответвления будет составлять требуемые +10 дБ·мВ. Потери на проход, вносимые выбранным ответвителем в основной кабель, равны 1 дБ, поэтому на проходе ответвителя в основной кабеле сигнал будет иметь уровень +23 дБ·мВ.

Для этой точки ответвления можно было бы выбрать ответвитель с более низким номиналом. Например, если бы выбрали ответвитель на 11 дБ, то подаваемый в ответвление уровень был бы на 11 дБ ниже входного уровня в основной кабеле, т.е. составил бы +13 дБ·мВ. Это более подходящий вариант для питания ответвления, чем с ответвителем на 14 дБ. Проходные потери, вносимые ответвителем на 11 дБ в основной кабель, равны 1,5 дБ, поэтому сигнал на выходе ответвителя в основной кабеле будет составлять уровень +22,5 дБ·мВ.

Уровень на входе сервисного ответвления, таким образом, будет по крайней мере на 3 дБ выше. Однако, очевидно, что последующий усилитель в основной кабеле несколько придется расположить ближе (примерно на 15 м) к точке ответвления и если это будет сделано много раз в системе большой протяженности, то, возможно, потребуется больше усилителей. С помощью этой методики можно организовать очень длинные сервисные ответвления в системе и если таких ответвлений требуется не слишком много, то увеличение стоимости системы за их счет будет вполне приемлемым. В любом случае это более правильное решение, чем установка дополнительного усилителя для обслуживания единственного абонента.

Проектирование системы выполняется на основе сетевых маршрутов и планов прокладки кабеля, составленных в результате измерений расстояний на местности. Поэтому следует сразу проанализировать данные по всем сервисным ответвлениям, чтобы найти те из них, длина которых превышает среднюю хотя бы на 50%.

15.6. Использование делителя в качестве ответвителя

Если пример на рис. 15.6 характерен, в основном, для городских систем относительно большого масштаба с большой нагрузкой вдоль маршрута кабеля, то следующий пример показателен для систем малого масштаба с меньшей нагрузкой, предназначенных для обслуживания областей с небольшой и средней плотностью населения, например, небольшого города или поселка. Несколько изменим условия и рассмотрим случай, когда примерно на той же длине усилительного участка, что и на рис. 15.6 (около 600 м), требуется расположить меньшее количество ответвителей. Расстояния между ответвителями в таком участке естественно увеличатся.

Глава 15. Проектирование усилительного участка

На рис. 15.7 показан случай, требующий использования четырех ответвителей на два выхода, расположенных на расстояниях 130 м друг от друга. Поскольку методики расчета узкополосного и широкополосного участка аналогичны, для простоты сделаем расчет только для одной частоты. Параметры ответвителей возьмем из табл. 15.7. Предположим, как и раньше, что на входах всех ответвлений требуется уровень +10 дБ·мВ, а на входе и выходе усилителей обеспечиваются уровни +9 дБ·мВ и +40 дБ·мВ соответственно. Используются кабель с потерями 4 дБ/100 м.

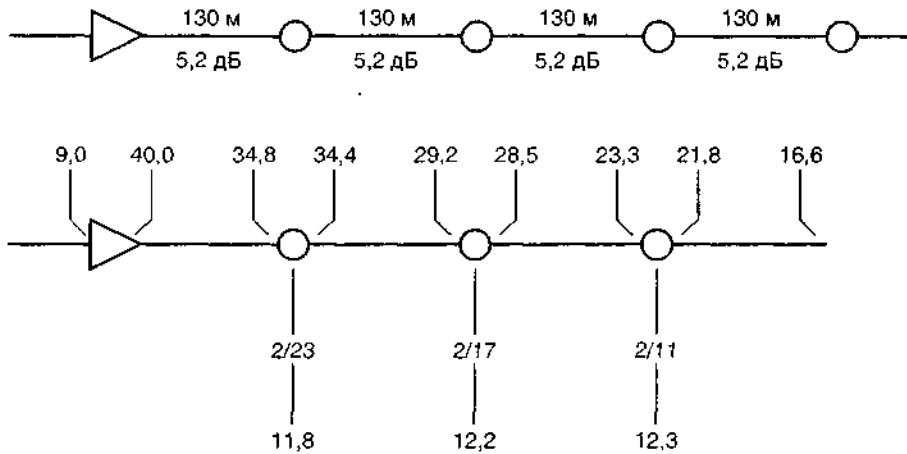


Рис. 15.7. Использование ответвителей

На рисунке показаны уровни сигналов и параметры для всех выбранных ответвителей, а также уровни сигналов на ответвлениях. На всех входах ответвлений требуемый уровень соблюдается (+10 дБ·мВ или выше). Результаты расчета этого участка отражены на рис. 15.7 и в табл. 15.11.

Таблица 15.11

Потери и уровни передачи (для рис. 15.7)

Прибор/ Кабель	Вносимые потери или усиление, дБ	Уровень в основном кабеле, дБ·мВ	Уровень на входе ответвления, дБ·мВ
Усилитель		40,0	
Кабель 130 м	5,2	34,8	
Ответвитель 2/23	0,4	34,4	11,8
Кабель 130 м	5,2	29,2	
Ответвитель 2/17	0,7	28,5	12,2
Кабель 130 м	5,2	23,3	
Ответвитель 2/11	1,5	21,8	12,3
Кабель 130 м	5,2	16,6	
Уровень сигнала < +10 дБ·мВ			

15.6. Использование делителя в качестве ответвителя

В точке, где должен быть установлен четвертый ответвитель, возникла небольшая проблема. Хотя уровень передачи в этой точке пока больше минимального (равен +16,6 дБ·мВ), при установке здесь любого ответвителя уровень сигнала станет меньше, чем +10 дБ·мВ. Из табл. 15.7 следует, что из всех имеющихся у нас ответвителей с двумя выходами наименьший номинал имеет ответвитель на 8 дБ. Использовать ответвитель на 4 дБ нельзя, потому что это терминирующий ответвитель и он может включаться только в окончание кабеля. Следовательно, наибольший уровень, который можно получить в этой точке составляет 8,6 дБ·мВ, что ниже требуемого. В этой ситуации существует несколько альтернативных вариантов решения. Один из них состоит в использовании делителя вместо последнего ответвителя.

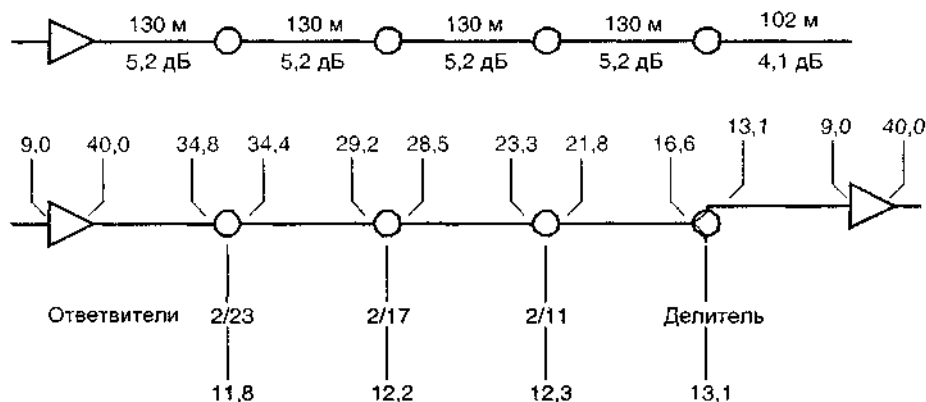


Рис. 15.8. Использование делителя вместо ответвителя

Взяв делитель, имеющий потери 3,5 дБ на каждом выходе, в позиции четвертого ответвителя, можно создать достаточный уровень +13,1 дБ·мВ на входе ответвления, как показано на рис. 15.8. Уровень, с которым сигнал проходит через делитель в основную кабель, также составляет +13,1 дБ·мВ. Поскольку требуется на входе следующего усилителя +9 дБ·мВ, то можно расположить его на расстоянии 102,5 м, понизив тем самым уровень сигнала на оставшиеся 4,1 дБ.

Заметим, что этот метод, хотя и обеспечивает требуемый уровень сигнала, позволяет подключить в этой точке только одно ответвление, и, кроме того, делитель не обеспечивает должной развязки (изоляции) для терминального оборудования, установленного в сервисной точке, которую обеспечивает ответвитель. Поэтому такой прием допустим только в исключительном случае, когда в этом месте требуется обеспечить обслуживание только одной изолированной точки. Если же разработчик учитывает, что позже возможно появление новой обслуживаемой нагрузки на участке, то более правильными являются другие методы. Это метод кабеля обратной связи и метод резервирования, рассмотренные далее.

15.7. Добавление нагрузки на участок

При проектировании участка после определения рабочих уровней сигналов, которые требуется получить в конечных точках участка и его ответвлений, нуж-

Глава 15. Проектирование усилительного участка

но вычислить все потери передачи, которые вносятся на участке отрезками кабеля и ответвителями, и обеспечить компенсацию усиления путем включения усилителя в основную кабель. Все ответвители, включенные в усилительный участок, составляют в совокупности нагрузку этого участка. Иногда бывает необходимо в дальнейшем увеличить нагрузку участка, добавив в него дополнительные ответвители. Если в систему вводится дополнительная нагрузка, она вносит в участок свои потери передачи. Результатом будет изменение уровней передачи в какой-либо секции участка и окончательные показатели качества передачи могут ухудшиться.

Такая ситуация может встретиться на любом иерархическом уровне системы КТВ. В качестве дополнительной нагрузки может рассматриваться магистральное ответвление, подающее сигнал в домовую распределительную сеть для обслуживания еще одного многоквартирного дома. Аналогичная проблема возникает и на уровне домовой распределительной сети, когда дополнительной нагрузкой является новая домовая ветвь или абонентский кабель для подключения новой квартиры. Чем ниже уровень распределительной сети (т.е. ближе к абоненту), тем проще решается эта проблема. Обычно при проектировании домовой распределительной сети обслуживаемая (сервисная) точка абонентского доступа планируется в каждом помещении, через которое проходит кабель. Эти точки оборудуются в сети даже если для каждой из них не определен абонент. Однако на уровне более высоком, чем уровень домовой сети, не всегда можно заранее установить количество сервисных точек, которое потребуется в будущем (под сервисной точкой здесь понимается уже не абонентская точка, а точка подключения домовой распределительной сети). Поэтому желательно так спроектировать участок, чтобы в нем была предусмотрена потенциальная возможность последующего подключения дополнительных сервисных точек. Существуют и другие методы решения этого вопроса, но наиболее грамотным является решением некоторая разумная способность к расширению, заложенная в первоначальный проект. Этот метод называется резервированием участка.

На рис. 15.9 показан гипотетический участок системы, включающий два ответвителя. Кроме того, показан усилитель этого участка и усилитель предыдущего участка системы. Уровни передачи выбраны произвольно равными +8 дБ-мВ и +40 дБ-мВ на входах и выходах усилителей соответственно, т.е. коэффициент усиления (полезное усиление) каждого усилителя составляет 32 дБ. Эти уровни и усиление были рассчитаны в зависимости от максимальной длины кабельного участка и показателей качества передачи в сервисных точках. Уровни на всех входах ответвлений равны +10 дБ-мВ или выше в соответствии со спецификацией.

На рис. 15.10 показан тот же участок, но с ответвлением, которое было установлено после завершения строительства системы. Внутри данного кабельного участка на отрезке кабеля между последним ответвителем и усилителем потребовалась новая сервисная точка и уровень сигнала в этой точке оказался равным +18 дБ-мВ, как показано на рисунке.

Если требуется, чтобы на входе ответвления уровень был не менее требуемых +10 дБ-мВ, то в этом месте в участок следует включить ответвитель с номиналом по крайней мере 8 дБ. Этот ответвитель будет вносить приблизительно 2,8 дБ потерь на проход в основной кабеле. Если вычисляем исходя из этого входной уровень усилителя, который расположен сразу после добавленного

15.7. Добавление нагрузки на участок

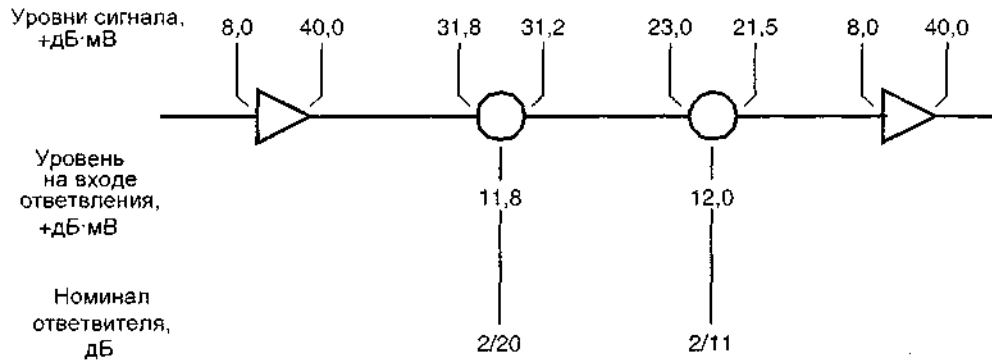


Рис. 15.9. Участок без резервирования

ответвителя, то получим, что он равен +5,2 дБ·мВ, что на 2,8 дБ ниже, чем было определено спецификацией для входа усилителя. Это приведет к ухудшению отношения C/N на этом усилителе на 2,8 дБ, по сравнению с запланированным номинальным значением. В каскаде из 25 – 30 усилителей такое ухудшение C/N на любом из усилителей может и не сказаться на общем показателе C/N в окончании системы. Если вносимые потери от включения дополнительного ответвителя составляют 10 – 15 дБ, то в какой-то точке системы ухудшение станет ощутимым. Напрашивается вывод, что необходимо увеличение уровней передачи, но это невозможно сделать, поскольку усилители уже выбраны и нормативные уровни в сервисных точках установлены. Нужно найти другой способ повышения уровня на входе усилителя. Оказывается, что это можно сделать путем установки дополнительной сервисной точки на другом отрезке участка.

Рассмотрим пример на рис. 15.11. Здесь при тех же прочих условиях изменились требования к обслуживанию, т.е. дополнительная сервисная точка потребовалась перед первым первоначально установленным ответвителем. При этом новом ее расположении уровень сигнала в точке ответвления стал равным +36 дБ·мВ. Для обеспечения требуемых +10 дБ·мВ на входе ответвления можно использовать ответвитель на 26 дБ, который вносит в основной кабель только 0,4 дБ потерь.

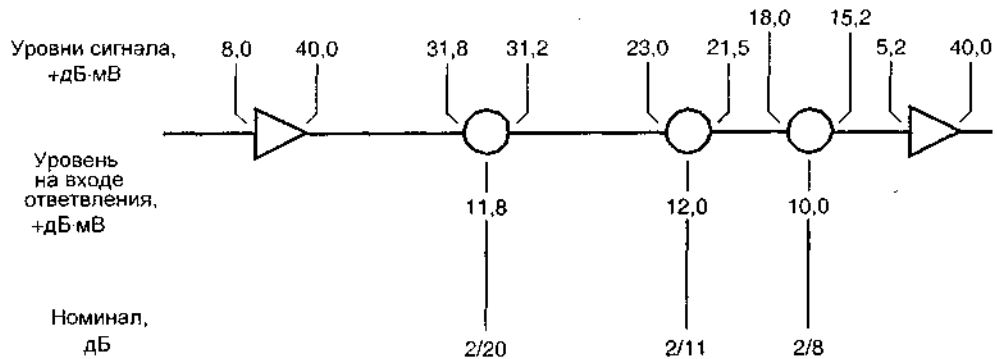


Рис. 15.10. Добавленная нагрузка (неудачное расположение)

Глава 15. Проектирование усилительного участка

Заметим, что уровни всех сигналов, проходящих в основном кабеле после нового ответвителя, теперь ниже на 0,4 дБ, включая и уровень на входе усилителя, который стал равен +7,6 дБ·мВ. Получаем явное улучшение по сравнению с предыдущим вариантом расположения дополнительной точки, так как отношение C/N ухудшилось только на 0,4 дБ, что относительно неплохо и в длинном каскаде усилителей будет вполне приемлемо. Однако, уровни сигналов на некоторых абонентских точках и в этом случае могут выйти за рамки спецификаций.

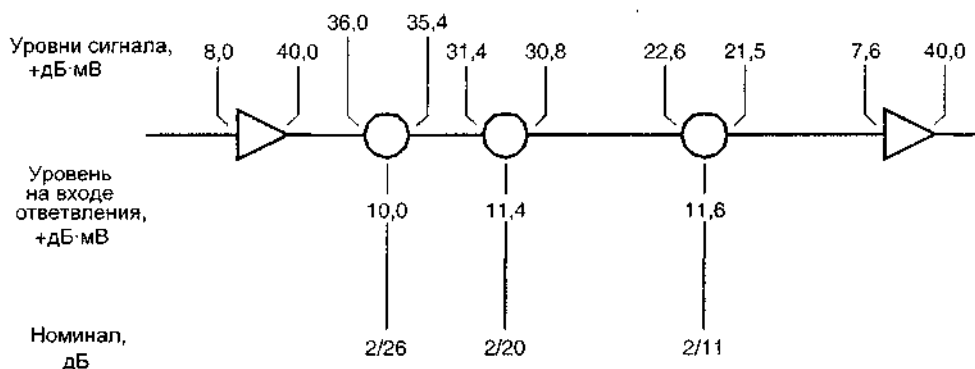


Рис. 15.11. Добавленная нагрузка (возможное расположение)

Эти примеры показывают, что включение в сеть новой сервисной точки может по-разному влиять на оконечные показатели системы: в первом случае отношение C/N ухудшилось на 2,8 дБ, а во втором случае оно ухудшилось только на 0,4 дБ. Все, что необходимо сделать – это выбрать подходящий ответвитель с таким номиналом, при котором на выходе основного кабеля осталось бы достаточное количество энергии для обеспечения требуемого входного уровня на усилителе. Это также можно сделать с помощью направленного ответвителя, который вносит гораздо меньшие потери не проход в основном кабеле. Когда включается новая нагрузка в уже построенную сеть КТВ, то вынуждены мириться с некоторым ухудшением, хотя и незначительным, показателей качества передачи. Если в течении эксплуатации происходило множественное добавление нагрузки, то показатели системы могут значительно отклониться от нормативных значений на отдельных ответвлениях системы, поэтому перед каждым включением новой сервисной точки необходим расчет уровней передачи.

Поскольку в этих примерах не применялось резервирование на участке, уровни в каждом из случаев оказывались ниже требуемых. Рассмотрим возможность включения дополнительной нагрузки на участке с резервированием.

15.8. Участок с резервированием

В предыдущем примере были установлены рабочие уровни сигналов +8 дБ·мВ на входе и +40 дБ·мВ на выходе каждого усилителя. Поскольку при включении в участок дополнительной нагрузки входной уровень на очередном усилителе оказался недостаточным, можно просто зарезервировать некоторое усиление, чтобы гарантировать требуемое качество передачи в оконечных точках системы.

15.8. Участок с резервированием

На участке, изображенном на рис. 15.12 используются те же ответвители, что и ранее, но теперь второй усилитель расположен в той точке, где уровень его входного сигнала равен +9 дБ·мВ, а не +8 дБ·мВ, т.е. ближе к предыдущему усилителю. Это снижает рабочее усиление усилителя на 1 дБ, а длина усилительного участка уменьшается на несколько метров, но отношение С/Н улучшается на 1 дБ. Теперь можно ввести в участок дополнительную нагрузку, создающую потери в размере 1 дБ, не ухудшая при этом оконечные показатели участка. Хотя при этом снижается ресурс каждого усилителя на 1 дБ, но для системы из 30 усилителей это снижение эквивалентно тому, как если бы из каскада был изъят только один усилитель. Таким образом добиваемся нужного эффекта (размещаем на участке дополнительную нагрузку) и сохраняем первоначальное расчетное отношение С/Н на 1 дБ.

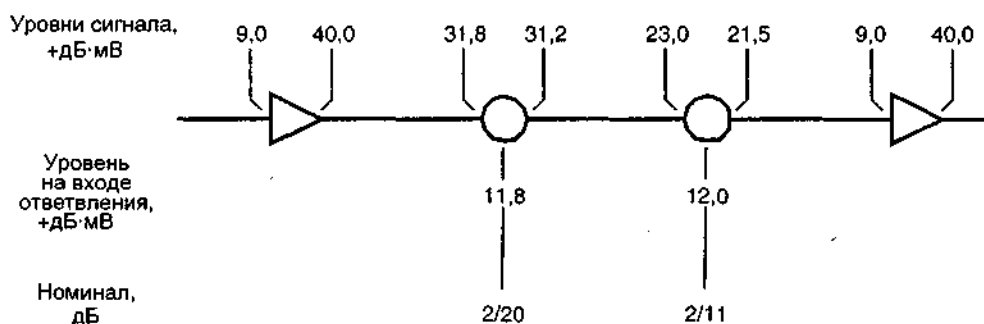


Рис. 15.12. Уменьшение длины участка

Этот способ эквивалентен способу, при котором протяженность участка остается неизменной, но увеличивается усиление усилителя. В этом случае усиление участка также превосходит суммарные потери в нем и ресурс усилителя используется не полностью до тех пор, пока в участок не включена дополнительная нагрузка.

Приведем пример построения участка этим способом. На рис. 15.13 представлен вариант расположения на участке четвертого ответвителя (см. пример на рис. 15.7), который является альтернативой использованию делителя вместо четвертого ответвителя. Опять решение состоит в том, что просто раньше включается следующий усилитель, перемещая его назад, ближе к интересующей нас точке расположения ответвителя. Уровень на входе этого усилителя будет выше, чем требовалось (+16,6 дБ·мВ вместо +9 дБ·мВ), но можно скорректировать эту разницу, понизив его до приемлемого значения с помощью аттенюатора на входе самого усилительного модуля. Теперь четвертый ответвитель расположен сразу же на выходе следующего усилителя. Здесь подойдет ответвитель на 29 дБ, а уровень на входе следующего кабельного участка станет тогда равен $40 \text{ дБ·мВ} - 0,4 \text{ дБ} = +39,6 \text{ дБ·мВ}$, а на входе четвертого ответвления получим приемлемый уровень +11 дБ·мВ.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что предварительное планирование разработчиком резервного усиления сглаживает последствия включения на участке новой обслуживаемой нагрузки, а величина резервирования определяет допустимую величину этой новой нагрузки.

Глава 15. Проектирование усилительного участка

В примере на рис. 15.11 резервирование не было обеспечено, а ответвитель был включен в той точке кабельного участка, где уровни передачи достаточно высоки. Хотя этот способ минимизирует влияние новой нагрузки на входной уровень следующего усилителя, сам эффект все же остается. Изменение уровня в окончании каждого сервисного ответвления заметно в пределах всего усилительного участка после точки включения нового ответвителя. В примере на рис. 15.12 резервирование достигалось путем более близкого расположения следующего усилителя. В этом случае внесение новых потерь (в пределах 1 дБ) на кабельном участке не уменьшит входной уровень усилителя ниже запланированного значения +8 дБ-мВ, поэтому в окончании системы не произойдет нарушения спецификации усилителя.

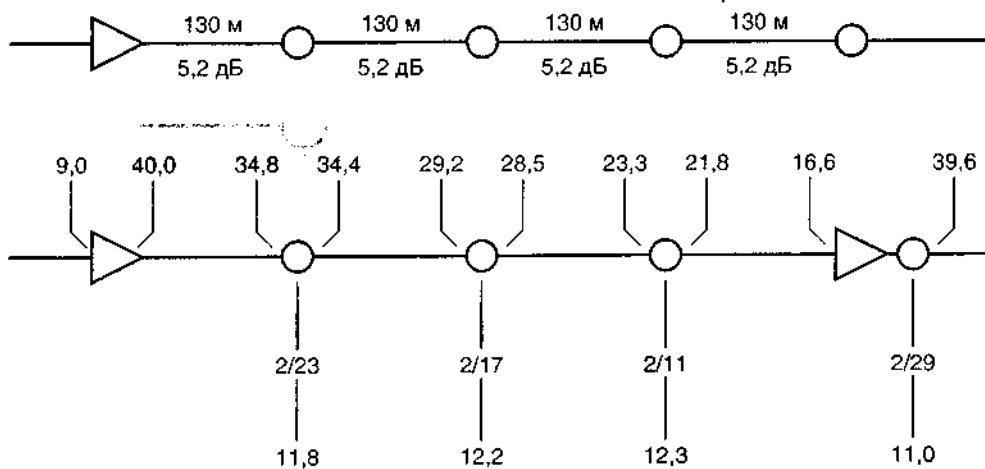


Рис. 15.13. Размещение четвертого ответвителя путем уменьшения участка

Аналогично можно поступить и с уровнем на выходе усилителя. Если не изменяем в действительности рабочий выходной уровень усилителя +40 дБ-мВ, но только предполагаем при проектировании участка, что он равен +39 дБ-мВ, то все уровни на ответвлениях будут изначально на 1 дБ выше. Если впоследствии добавляется новая нагрузка с потерями меньшими или равными 1 дБ, то параметры не выйдут за рамки спецификаций, хотя уровни сигналов на всех ответвлениях снизятся на 1 дБ. Т.е. расчет участка выполняется для значений +39 дБ-мВ выходного уровня предыдущего усилителя и +8 дБ-мВ входного уровня следующего усилителя, но в действительности устанавливается на выходе усилителя уровень +40 дБ-мВ и создается на входе следующего усилителя уровень +9 дБ-мВ. Этот способ также обеспечивает резерв усиления в 1 дБ и накладывает то же ограничение в 1 дБ на вносимые потери от новой нагрузки, но теперь можно, не нарушая спецификаций системы, включить новую нагрузку в любой точке, независимо от уровней на ответвлениях основного участка. Длина участка в этом случае та же, что и раньше (31 дБ в значении потерь передачи).

Этим методом можно создать резерв усиления любой разумной величины, причем на тех кабельных участках, где это необходимо, но это сильнее отра-

15.8. Участок с резервированием

зится на стоимости системы. Если с высокой вероятностью места расположения и величина новой нагрузки известны, то резервирование можно обеспечить именно для этой нагрузки при первоначальном проектировании участка. Но если нельзя предсказать, в каком именно месте системы появится новая нагрузка, то правильнее будет предусмотреть такую возможность для каждого кабельного участка, обеспечив защиту всех участков в равной степени. Разместить дополнительную нагрузку можно еще одним тривиальным способом, который основан на использовании кабеля “обратной связи”.

15.9. Участок с “обратной связью”

В том случае, когда добавляемая нагрузка является значительной или располагается в наиболее проблемной области участка, можно использовать метод, который в зарубежной литературе называется методом “кабеля обратной связи” (feed back cable). Например, глядя на рис. 15.10, можно сказать, что для показанного там участка наиболее сложная область находится непосредственно перед усилителем данного участка, где установлен третий (дополнительный) ответвитель. Суть метода состоит в том, что третий ответвитель на данном участке не устанавливается, а вместо этого на выходе усилителя устанавливается направленный ответвитель, подключенный непосредственно к данному усилителю без соединительного кабеля. Направленный ответвитель, таким образом, включается уже в следующий усилительный участок. Кабель, подключенный к направленному ответвителю, располагается параллельно основному кабелю и подает сигнал в нужную точку, возвращая сигнал назад, в зону обслуживания первого усилительного участка. В этот параллельный кабель и включается дополнительная нагрузка с опять же помощью ответвителя. Тем самым обеспечивается относительно высокий уровень сигнала в точке включения направленного ответвителя и, соответственно, в точке подключения “обратного” ответвления при том, что потери, вносимые ответвителем в основном кабеле, невысоки и гарантированно находятся в пределах нашего резерва усиления (1 дБ). Хотя этот метод и называется методом “обратной связи”, здесь нет замкнутой цепи обратной связи в том смысле, в каком это понятие используется в радиотехнике. Сигнал всего лишь ответвляется в кабель, проходящий вдоль основного участка, а интересующая нас дополнительная нагрузка размещается на некотором расстоянии перед точкой расположения усилителя, т.е. как бы включается в тот же участок, что и раньше.

Поскольку на выходе усилителя уровень составляет +40 дБ-мВ, то направленный ответвитель на 16 дБ с вносимыми потерями 0,6 дБ обеспечит уровень +24 дБ-мВ, достаточный для питания параллельного кабельного направления. Параллельный кабель “обратной связи” может использоваться двумя способами: либо к нему подключается новая нагрузка, либо на него переносятся ответвители, уже имеющиеся в основном кабеле. Второй вариант можно рассматривать как способ разгрузки основного направления кабеля, что иногда бывает необходимо сделать.

На рис. 15.14 показано расположение направленного ответвителя, новой сервисной точки и параллельного кабеля, предназначенного для размещения новой нагрузки на расстоянии перед усилителем данного участка меньшем, чем длина третьего отрезка кабеля. При другом способе решения размещение новой нагрузки представляло бы большие трудности. Этот способ можно считать

Глава 15. Проектирование усилительного участка

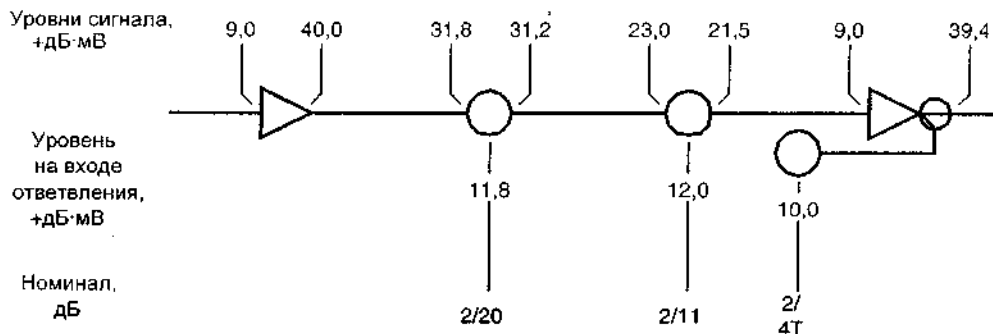


Рис. 15.14. Кабель "обратной связи"

более эффективным еще и потому, что входной уровень усилителя здесь не уменьшается, по сравнению с примером на рис. 15.10, где уровень падает до +5,2 дБ·мВ.

Возвращаясь к примеру на рис. 15.7, попробуем установить в требуемой точке четвертый ответвитель методом кабеля "обратной связи". На рис. 15.15 показано, как на выходе следующего усилителя установлен направленный ответвитель, к которому подключен параллельный кабель обратной связи для подачи сигнала в сервисную точку данного участка. В окончании кабеля обратной связи установлен четвертый ответвитель (2/4-T) с ответвлением, обслуживающим эту сервисную точку. Уровень сигнала в основном кабеле в нужной точке включения ответвителя был равен +16,6 дБ·мВ (рис. 15.7). Поскольку на входе следующего усилителя должно быть +9 дБ·мВ, то можно расположить его на расстоянии 190 м от данного ответвителя, понизив тем самым уровень сигнала на 7,6 дБ. Длина четвертого отрезка соединительного кабеля, следовательно, составит 320 м.

На выходе этого усилителя поставим направленный ответвитель DC-16. Так как уровень на выходе усилителя +40 дБ·мВ, то это создаст на входе параллельного кабеля обратного питания уровень +24 дБ·мВ. Тогда в интересующей нас позиции четвертого ответвителя поступит сигнал с уровнем +16,4 дБ·мВ, и при использовании терминирующего ответвителя 2/4T на 4 дБ уровень на входе ответвления будет равным +12,4 дБ·мВ.

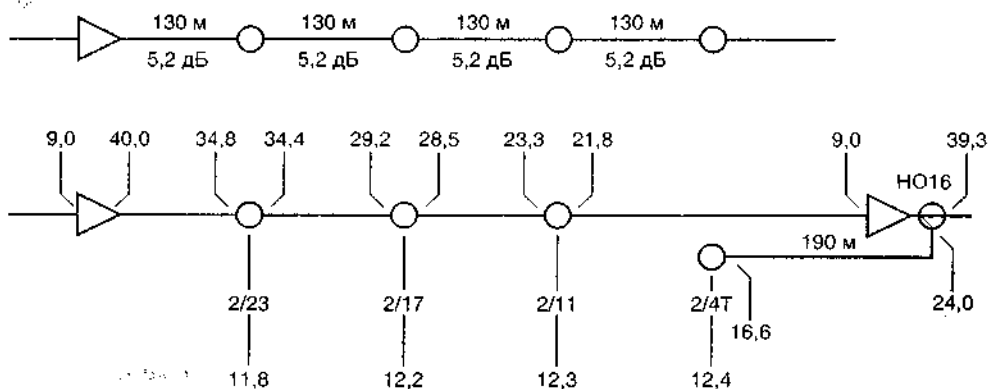


Рис. 15.15. Размещение четвертого ответвителя методом "обратной связи"

15.9. Участок с "обратной связью"

Можно заметить, что ответвитель с номиналом 16 дБ вносит в основной кабель потери 0.7 дБ, поэтому уровень сигнала, подаваемого на следующий кабельный участок, равен $40 \text{ дБ-мВ} - 0.7 \text{ дБ} = 39.3 \text{ дБ-мВ}$.

Все три метода (включение делителя вместо ответвителя, резервирование и обратная связь) применимы как в случае необходимости установить на участке требуемое количество ответвителей при первоначальном проектировании, так и для обеспечения возможности включения дополнительной нагрузки позднее, но каждый метод имеет свои особенности и обеспечивает свою степень защиты. Какой метод применять, во многом зависит от того, какова в действительности будет эта новая нагрузка. Сравнение методов по величине получаемой протяженности участка, представленное для примеров рис. 15.8, 15.10, 15.15, приведенное ниже, поможет понять их различие.

Сравнение методов построения участка

Метод	Длина усилительного участка
Делитель вместо ответвителя	622 м
Уменьшение длины участка	520 м
Кабель "обратной связи"	710 м

Метод более близкого расположения усилителя очень привлекателен тем, что не требует прокладки параллельного кабеля. Но он, однако, отнимает некоторую часть ресурса усилителя, сокращая длину усилительного участка. Когда известно, что не потребуется увеличивать протяженность кабельного маршрута, как, например, в городских системах, то метод близкого расположения усилителя оказывается более предпочтительным по сравнению с методом обратной связи. Но если метод близкого расположения применяется на очень длинных кабельных маршрутах систем с небольшой плотностью нагрузки, то в случае такого расположения нескольких блоков в системе может возникнуть необходимость в добавлении одного или двух усилителей в каскад системы, что сделает этот способ менее выгодным. Только при условии, что на кабельном маршруте предполагается несколько мест включения дополнительной нагрузки, уменьшение усилительного участка может дать экономический эффект. Обратный кабель позволяет подключить нагрузку в нужной точке и удлиняет участок, но требует использования направленного ответвителя и дополнительного кабеля. Если проблемная точка всего одна или их немного на маршруте кабеля, то оптимален вариант со делителем как с точки зрения длины участка, так и по стоимости решения.

15.10. Примеры проектирования участков

В заключение главы приведем несколько примеров проектирования усилительных участков, чтобы продемонстрировать затруднительные ситуации, которые могут встречаться в реальных условиях и дадим критическую оценку каждому варианту решения.

Пример 1.

На рис. 15.16 показана схема усилительного участка маршрута распределительной сети, по которой необходимо выполнить проектирование направлений Главной улицы, Верхней улицы и Нижней улицы, используя рассмотренные

Глава 15. Проектирование усилительного участка

выше методики. Предполагается, что усилитель предыдущего участка расположен на основном маршруте в крайней точке участка Главной улицы, т.е. слева от точки включения первого ответвителя на 4 выхода. Числа между ответвителями обозначают длины отрезков соединительного кабеля в метрах.

Выберем усилители с выходным уровнем +40 дБ·мВ и входным уровнем +9 дБ·мВ. Предполагаемые точки, в которых должны быть включены пассивные приборы, показаны окружностями и квадратами. Цифры 2 и 4 около каждой точки обозначают необходимое количество выходов ответвителя, т.е. количество сервисных точек, которые требуется подключить к ответвителю в этом месте. Около каждого отрезка соединительного кабеля показано расстояние между ответвителями в метрах.

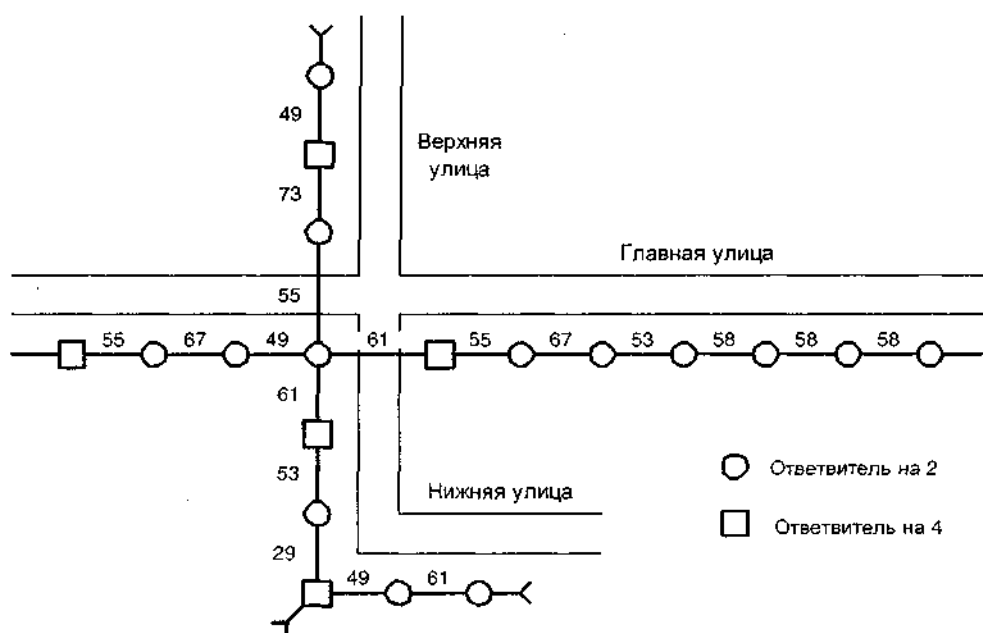


Рис. 15.16. Пример 1

Потери в кабеле будем считать равными 4 дБ на 100 м. Как и ранее, уровни на входах всех ответвлений, должны быть более или равны +10 дБ·мВ. На рис. 15.17 приведен вариант использования двух делителей для организации второстепенных участков улиц Нижней и Верхней на их пересечении с Главной улицей. Вычисляя потери на каждом отрезке кабеля, получим значения уровня передачи и параметры выбранных ответвителей, показанные на рисунке.

На рис. 15.18 изображена та же самая часть сети и по-прежнему все уровни соответствуют требованиям. Но в этом случае усилитель перемещен на пересечение участков Главной и Верхней улиц, что сделало возможным ответвление основного кабеля с помощью направленного ответвителя на 20 дБ, а не с помощью ответвителя. Второй усилитель на главном маршруте кабеля теперь расположен на три соединительных промежутка (т.е. на 174 м) дальше, чем в предыдущем варианте.

15.10. Примеры проектирования участков

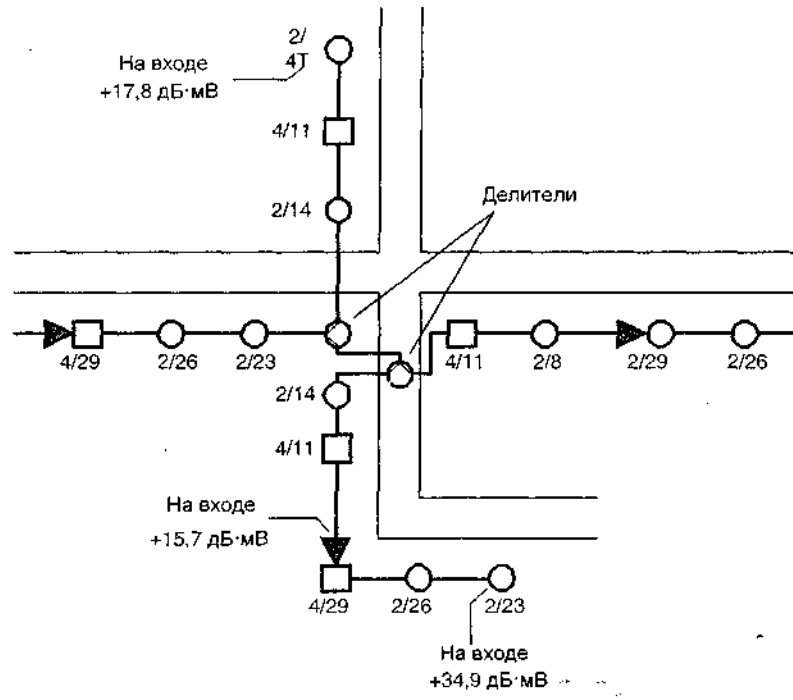


Рис. 15.17. Применение делителей

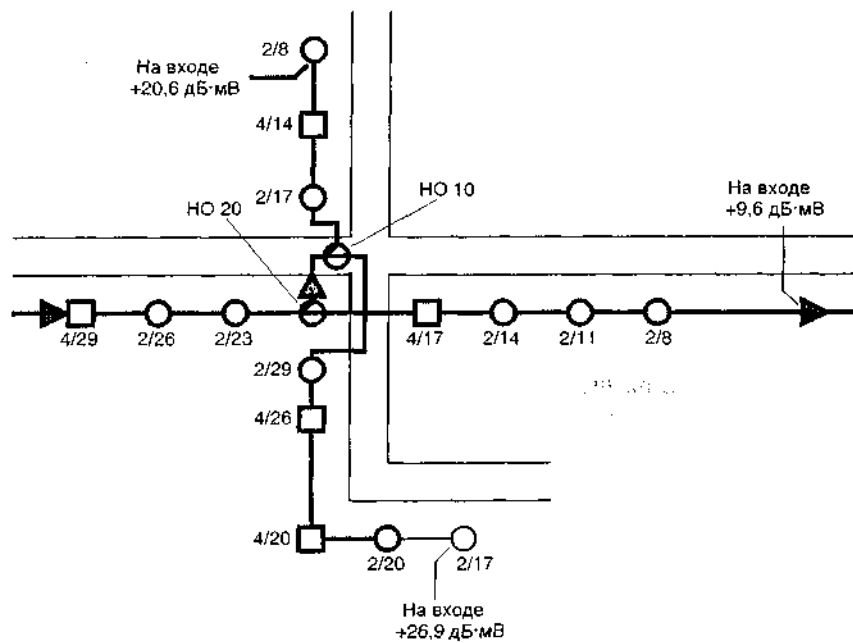


Рис. 15.18. Применение направленных ответвителей

Глава 15. Проектирование усилительного участка

По стоимости строительства эти два варианта примерно одинаковы. Из-за длины участков и ответвителей нагрузки расходящихся кабельных направлений невозможно уменьшить количество усилителей. Однако, простым перемещением усилителя, который в любом случае обязаны поставить, увеличиваем протяженность усилительного участка основного кабеля на 174 м без дополнительных затрат. Поэтому при прочих равных условиях вариант прокладки с применением направленного ответвителя более эффективен.

Пример 2.

На рис. 15.19 приведен вариант организации второстепенного маршрута кабеля с помощью делителя в той точке основного кабельного маршрута, где уровень сигнала равен +30 дБ·мВ. Однако, расчет показал, что такая попытка создания второстепенного маршрута оказывается неудачной, поскольку уровень сигнала в его окончании слишком низок для обслуживания последних двух сервисных точек, что и показано на этом рисунке. Можно было бы поставить перед последними двумя точками еще один усилитель, но это решение неэкономично. Попытаемся создать пассивное второстепенное направление, т.е. без использования в нем усилителя.

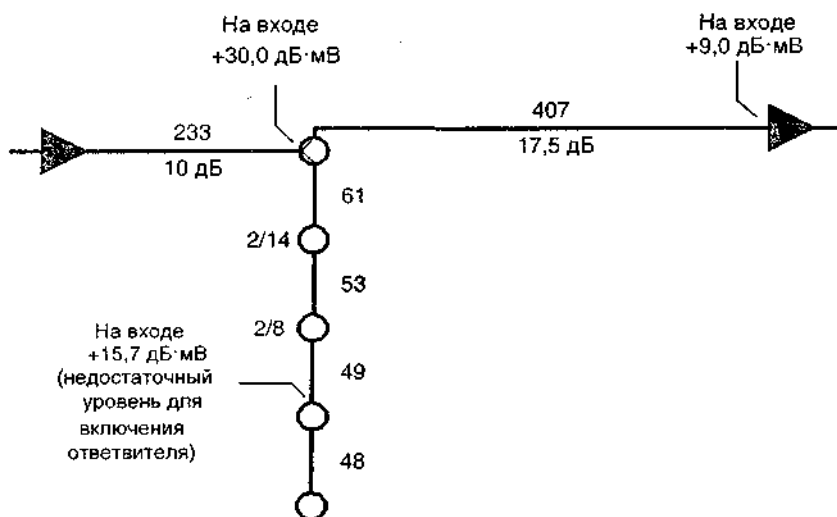


Рис. 15.19. Применение делителя

На рис. 15.20 показан вариант, в котором для этого был использован направленный ответвитель, включенный в основной маршрут кабеля вместо делителя. Этот способ позволяет подключить требуемое количество сервисных точек, но тоже имеет свои недостатки. Обратите внимание, что для обслуживания всего второстепенного направления необходим достаточно высокий уровень сигнала на его входе, поэтому пришлось подключить его к проходному выходу направленного ответвителя, а к тому выходу направленного ответвителя, на котором потери высоки, подключено продолжение основного маршрута. Это создало дополнительные потери 8 дБ в основном кабеле и значительно уменьшило протяженность усилительного участка (на 105 м). Этот вариант решения можно принять только, если за пределами точки ответвления длину основного кабеля можно ограничить.

15.10. Примеры проектирования участков

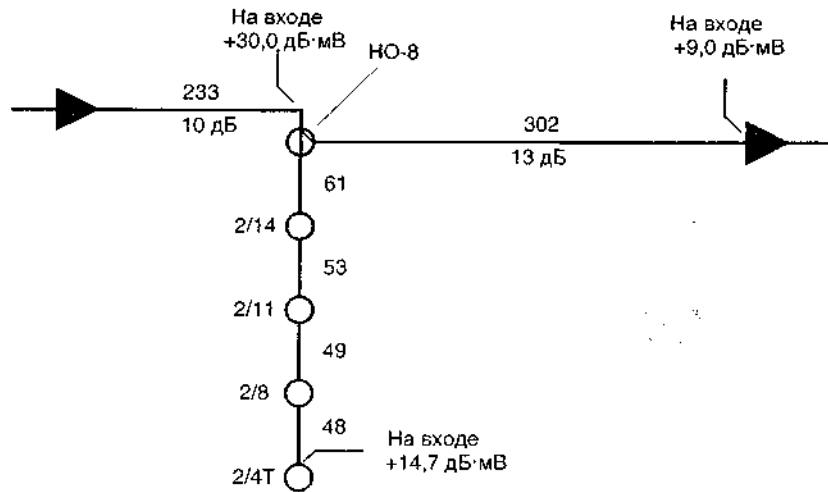


Рис. 15.20. Применение направленного ответвителя

С другой стороны, если после этой точки предстоит прокладывать достаточно длинный маршрут основного кабеля, то следует отказаться от создания здесь пассивного направления и попытаться максимизировать протяженность усилительного участка на основном маршруте. Это можно сделать, как показано на рис. 15.21, т.е. с помощью направленного ответвителя на 20 дБ в основном кабеле и усилителя, предназначенного уже специально для подачи сигнала во второстепенное направление. Причем на этот раз направленный ответвитель установлен правильно, т.е. так, что в основной кабель он вносит незначительные проходные потери, а в ответвленном направлении кабеля потери составляют 20 дБ . Таким образом потери в основном кабеле составляют только $0,6 \text{ дБ}$, а следующий усилитель на основном маршруте будет теперь распо-

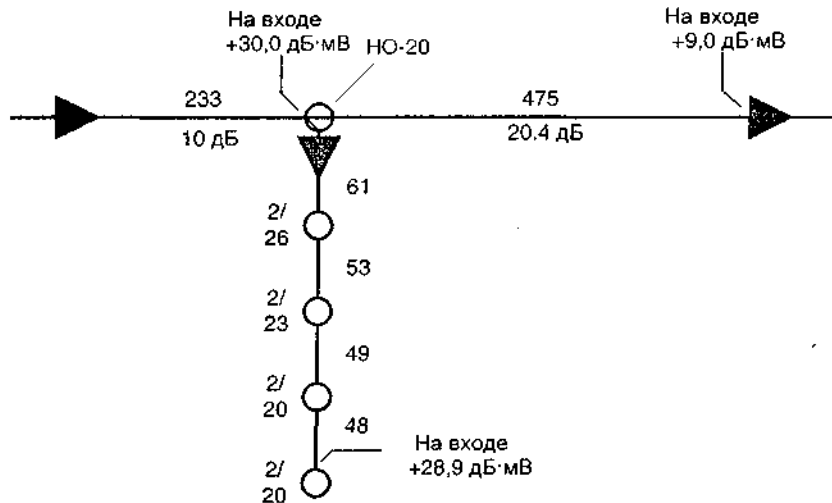


Рис. 15.21. Применение направленного ответвителя и усилителя

Глава 15. Проектирование усилительного участка

жен на расстоянии 475 м от точки ответвления (сравните с предыдущим пассивным вариантом, где это расстояние составляло 302 м). Этот вариант можно рассматривать и как имеющий свои преимущества, и как имеющий свои недостатки, в зависимости от величины затрат на усилитель второстепенного направления.

Резюме

Планирование последовательного размещения ответвителей для обслуживания сервисных точек вдоль маршрута кабеля является существенной задачей на начальном этапе проектирования участков распределительной сети, причем под сервисной точкой может пониматься и конечная абонентская точка и граничная точка магистральной сети, к которой подключена домовая распределительная сеть. Для большинства систем независимо от их структуры необходимо некоторое заблаговременное резервирование для подключения новой обслуживаемой нагрузки, особенно учитывая возможность поддержки в сети других служб, таких как передача данных, аварийная сигнализация и других. На уровне домовых сетей эта проблема решается проще – обычной практикой является оборудование сервисной точки для каждого жилого помещения, находящегося в области сети. Однако, это не гарантирует, что при последующем расширении не понадобится установка новых абонентских точек, поскольку количество абонентов может не соответствовать количеству помещений. Эффективность использования ответвителей можно повысить путем разумного увеличения уровней передачи в системе.

Если зарезервировать снижение выходного уровня на 1 дБ на участке на начальном этапе проектирования системы, то тем самым обеспечить возможность включения на этом участке дополнительной нагрузки, вносящей потери не более 1 дБ. Последующая ее установка не потребует никаких изменений или перенастройки работающей кабельной сети и сетевого оборудования и не затронет ни показатели данного участка, ни системы в целом. Резервирование достигается путем уменьшения длины усилительного участка или повышением усиления усилителей. Кроме этого, подключение нагрузки может выполняться методом обратной связи и путем использования делителя вместо ответвителя. При выборе метода разработчик, как правило, исходит из экономического эффекта конкретного решения.

Расчет усилительных участков широкополосной системы передачи выполняется по той же методике, что и расчет для узкополосной системы, с той только разницей, что все показатели необходимо вычислять для двух частот передачи – нижней и верхней частот спектра передачи.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

При проектировании распределительных сетей необходимо различать сети по масштабу области обслуживания, поскольку для сети каждого масштаба наиболее целесообразным и экономически оправданным будет применение своего подхода к проектированию. Масштаб сети определяется соотношением размера области обслуживания и плотности населения внутри области, а также равномерностью распределения ответвленной нагрузки внутри области вдоль маршрута магистрали.

В этой главе рассмотрим технические аспекты проектирования кабельных сетей разного масштаба. Большие распределительные кабельные сети определим как системы, в которых необходимо частое включение ответвителей, что обусловлено высокой плотностью населения, а, кроме того, большая ответвленная нагрузка распределена почти равномерно по всей обслуживаемой области. Высокая плотность ответвленной нагрузки является основным отличительным признаком сетей этого типа. Распределительные кабельные сети малого масштаба определим как системы, в которых ответвленная нагрузка относительно невысока из-за малой плотности населения и распределена она неравномерно в пределах обслуживаемой области. Основным признаком сетей такого типа является низкая плотность нагрузки. Разумеется это деление является в значительной мере условным, но обычно в реальной ситуации можно определить, к какому типу будет относиться создаваемая сеть. Примерами сетей большого масштаба является сеть масштаба города или городского района. Область обслуживания такой сети ограничена, как правило, границами самого города. К сетям малого масштаба относятся сети, создаваемые в небольших городах, поселках и в сельской местности. Хотя их и называют системами малого масштаба, в действительности их область обслуживания является довольно протяженной (до 25 км). Поэтому имеет смысл именно соотношение размера области и плотности нагрузки в ней, поскольку сеть может быть большой по размеру, но иметь низкую нагрузку или, наоборот, иметь небольшие размеры и высокую нагрузку. В первом случае имеем сеть малого масштаба, а во втором – сеть большого масштаба.

При проектировании распределительных сетей используется две основных методики – на основе структуры транк-фидер и на основе одного кабельного маршрута.

16.1. Методика транк-фидер

Основной методикой построения распределительных сетей большого масштаба на основе коаксиального кабеля является методика транк-фидер или магистраль-субмагистраль. В последующих главах будем неоднократно возвращаться к этой методике проектирования распределительной сети. Принцип

Глава 16. Проектирование распределительной сети

этой методики состоит в делении всей распределительной структуры на две существенно различающихся по методике проектирования подсистемы – транковую (от слова trunk, магистраль) и фидерную (от feeder, питающая линия).

Подходы к проектированию этих подсистем различаются, так как на них возлагаются абсолютно разные задачи. Основная задача транковой подсистемы заключается в передаче сигнала на максимальное расстояние с наименьшими искажениями, а задача фидерной подсистемы состоит в распределении сигнала между множеством абонентских точек. Сигнал из транковой подсистемы подается во множество фидерных подсистем, подключаемых к транку с помощью ответвителей и сервисных ответвлений. Согласно архитектуре системы КТВ, магистральная линия передачи является транковой подсистемой, а магистральные ответвления вместе с домовыми распределительными сетями являются фидерными подсистемами. Соответственно, магистральными усилителями являются транковые и мостовые усилители, а домовые усилители являются фидерными. Вообще под фидером понимается кабельное ответвление, с помощью которого сигнал с основного маршрута кабеля подается в некоторую сервисную точку.

Транковая подсистема, предназначенная для передачи сигналов только в пределах выделенного ей распределительного сегмента области, должна быть спроектирована исходя из всей протяженности этого сегмента при условии ограничения накопленного в ней вносимого шума и нелинейных искажений. Целью разработчика является достижение оптимальных показателей в транке, установив в нем умеренно высокие рабочие уровни сигналов, т.е. понизив уровни, насколько это возможно при заданной протяженности системы. Уменьшить уровни передачи можно путем уменьшения усиления, но это приведет к уменьшению длин усилительных участков. Поэтому в транке используется более качественный кабель большего диаметра с меньшими потерями и большей стоимостью. Снижение уровней передачи в транке приводит к снижению эффективности ответвителей. Снижение эффективности ответвлений и увеличение стоимости является неизбежными побочными эффектами при проектировании транка.

Абонентские ответвления в схеме транк-фидер не подключаются в транковый кабель напрямую, а если абонентское ответвление необходимо на маршруте транкового кабеля, то необходимо использовать вторичный параллельный кабель, в который и включается абонентский ответвитель. Это можно рассматривать как еще одно ограничение методики транк-фидер, но на практике оно несущественно, поскольку случай расположения отдельных абонентов на участке городской магистрали является скорее теоретическим.

Фидерная подсистема создается для прямого обслуживания всех абонентских точек. Подчеркнем, что эта вторая подсистема является отдельной частью системы передачи, предназначенной исключительно для распределения сигнала. Фидерная структура строится так, обслуживать только свой участок распределительной сети, например, многоквартирный дом. Фидерная подсистема должна работать при высоких уровнях передачи, чтобы обеспечить высокую эффективность ответвителей. Увеличение выходных уровней усилителей значительно увеличивает интермодуляционные искажения, вносимые этими усилителями. Чтобы ограничить вносимую фидером интермодуляцию до приемлемых значений, необходимо наложить ограничение на количество фидерных

усилителей, которые будут последовательно установлены в каскаде, о чем скажем чуть позже.

Существует два варианта структуры транк-фидер. Они различаются по типам фидерных устройств. К первому типу относятся структуры с пассивным фидером, который выполняет только основную функцию, т.е. ответвляет сигнал для обслуживания сервисной точки без какого-либо дополнительного усиления. Фидеры второго типа – это активные фидеры, в которых кроме ответвления сигнала происходит еще и его усиление. Активный фидер используется для поднятия уровня сигнала с целью увеличения эффективности использования ответвителей в кабеле. Обычно это достигается применением мостового усилителя (транковый усилитель с вмонтированным в него мостовым блоком), о структуре и назначении которого уже говорилось. Схема такого устройства была приведена в обзорной главе по оборудованию коаксиальных систем. Уровни передачи в основном (транковом) кабеле при этом не нарушаются.

Входной сигнал мостового блока подается через направленный ответвитель, который вносит лишь незначительные номинальные потери передачи в транковый кабель. Однако, мостовой усилитель работает (в части ответвления) при существенно более высоких выходных уровнях, чем обычный транковый. Типичными значениями уровней являются +32 дБ-мВ для выхода транкового усилителя и +48...+50 дБ-мВ для выхода мостового усилителя.

Очевидно, что в схеме с активным фидером получаем более высокие интермодуляционные искажения, но они сводятся к минимуму, благодаря ограничению длины последующего фидерного каскада. Заметим, что усилители обоих типов (мостовые и транковые) устанавливаются на основном кабельном маршруте, т.е. включаются в один и тот же транковый кабель. На рис. 16.1 показана схема транк-фидер с активным фидером. Это устройство требует только одной точки электропитания и техническое обслуживание двух блоков совмещается, но главное состоит в том, что это устройство позволяет отдельно настраивать уровень транкового и фидерного выходного сигнала, поскольку оно включает два отдельных модуля с индивидуальными регуляторами усиления.

Для сравнения приведем похожий вариант построения сети, который, однако, нельзя путать со схемой активного фидера. На рис. 16.2 показано ответвление второстепенного направления от главного кабельного маршрута с помощью направленного ответвителя.

Эта ситуация подобна примеру на рис. 16.1, за исключением того, что здесь в ответвленном направлении установлен транковый усилитель. Принципиальное отличие этого варианта состоит в том, что оба маршрута – основной и ответвляемый – здесь равноправны. Заметим, что в обоих направлениях установлены одинаковые усилители и используются одинаковые уровни сигнала. Иначе говоря, оба маршрута принадлежат одному иерархическому уровню сети, например, магистральному. Изменение уровня сигнала при ответвлении не происходит, поэтому ответвленное направление нельзя считать фидером. Сигнал усиливается только после разветвления и его усиление полностью возлагается на ответвленное направление. Такая ситуация является частным случаем обычного разветвления транкового кабеля на несколько кабельных маршрутов с пропорциональным делением сигнала. Подобная схема была приведена в предыдущей главе.

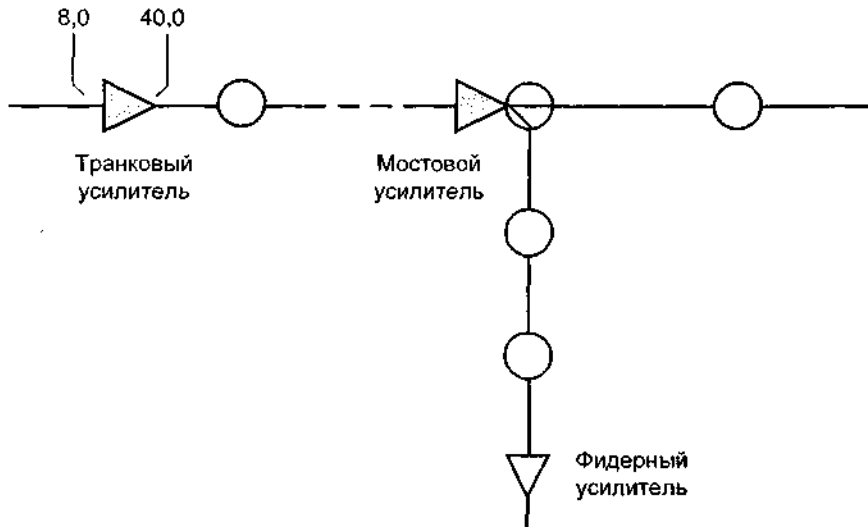


Рис. 16.1. Схема транк-фидер с активным фидером

Схема с пассивным фидером применяется, когда сервисные точки расположены вдоль главного кабельного маршрута так, что ответвители необходимо устанавливать на коротких расстояниях друг от друга.

Если уровень передачи в главном кабеле довольно высок, то можно просто ответвлять сигнал с нужным уровнем в фидерный кабель, не прибегая к использованию мостовых усилителей, как показано на рис. 16.3. Тот факт, что в ответвлении установлен усилитель не делает его активным, так как под понятием "активный" подразумевается усиление именно при ответвлении (см. предыдущий рисунок). В этой схеме ответвленное направление, очевидно, является фидером, поскольку уровни сигнала при ответвлении изменились и в ответвлении используется усилитель другого типа, нежели в транке. Типична ситуация, когда усилитель в качестве транкового усилителя выступает магистральный, а в качестве фидерного усилителя выступает домовый усилитель. Решение на основе пассивных фидеров более подходит для систем малого масштаба с высокой плотностью нагрузки вдоль основного кабельного маршрута.

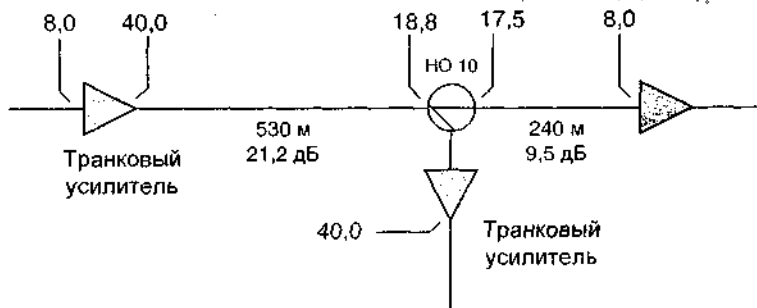


Рис. 16.2. Разветвление транка

16.1. Методика транк-фидер

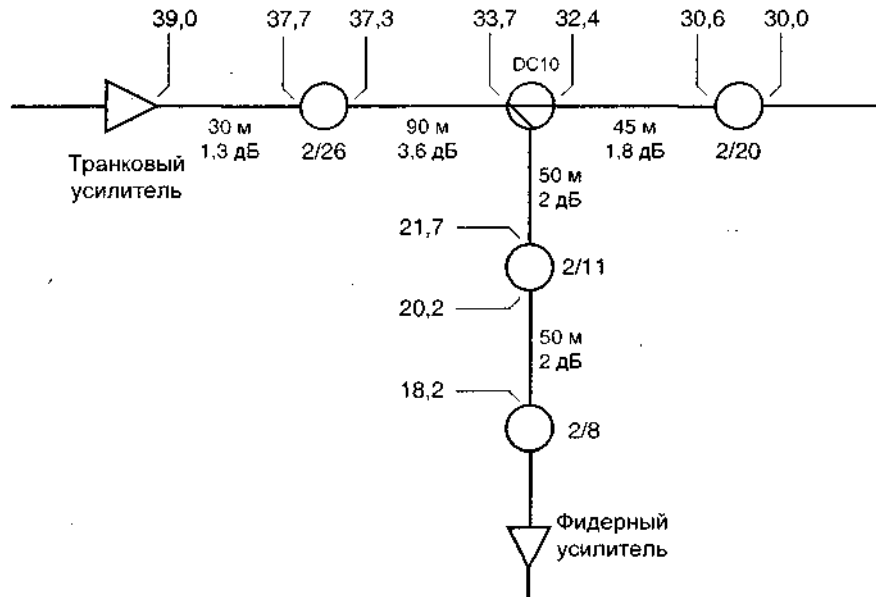


Рис. 16.3. Схема транк-фидер с пассивным фидером

16.2. Проектирование сети большого масштаба

Допустим, требуется построить магистральную распределительную сеть, обслуживающую большой город. При проектировании магистральной распределительной сети большого масштаба разработчик сталкивается с необходимостью обслуживания большой и равномерно распределенной ответвленной нагрузки. В предыдущей главе рассматривался вопрос эффективности ответвлений в связи с проектированием усилительного участка. В условиях очень высокой нагрузки не удивительно, что основная идея проекта городской сети направлена прежде всего на достижение максимальной эффективности использования ответвителей для абонентских ответвлений. Это требует поддержания высоких уровней передачи сигналов на всем маршруте магистрального кабеля, что, в свою очередь, накладывает требование повышения уровней сигналов на усилителях системы. Ранее было показано, что при высоких выходных уровнях в сигнал вносятся большие интермодуляционные искажения от усилителей. Если сигнал проходит через каскад из множества усилителей с высокими выходными уровнями, то можно получить неприемлемые окончательные показатели системы. Конечно, поддержка высоких уровней передачи подразумевает, что и входные уровни передачи также должны быть высокими, поэтому следует ожидать, что отношение C/N каскада будут удовлетворительным. Таким образом, такие противоречивые требования к распределительной системе создают дилемму: как ограничить искажения в системе и одновременно достичь высокой эффективности ответвлений.

Практическим решением этой дилеммы является использование методики транк-фидер. Последующее комбинирование двух созданных отдельно подсистем позволяет построить систему передачи с приемлемыми показателями в

Глава 16. Проектирование распределительной сети

целом. Основные технические приемы построения систем большого масштаба по принципу транк-фидер, почти повсеместно используемые сегодня при проектировании систем КТВ в городских условиях, показаны на рис. 16.4.

Изображенные здесь небольшие участки распределительной сети, расположенные на некотором расстоянии друг от друга, могут повторяться множество раз при охвате больших областей. Магистральная подсистема предназначена для подачи сигналов в местные домовые распределительные сети. Собственные шумы и интермодуляция в магистрали комбинируются с шумами и интермодуляцией со стороны домовых сетей, поэтому подходить к ее проектированию нужно очень осторожно.

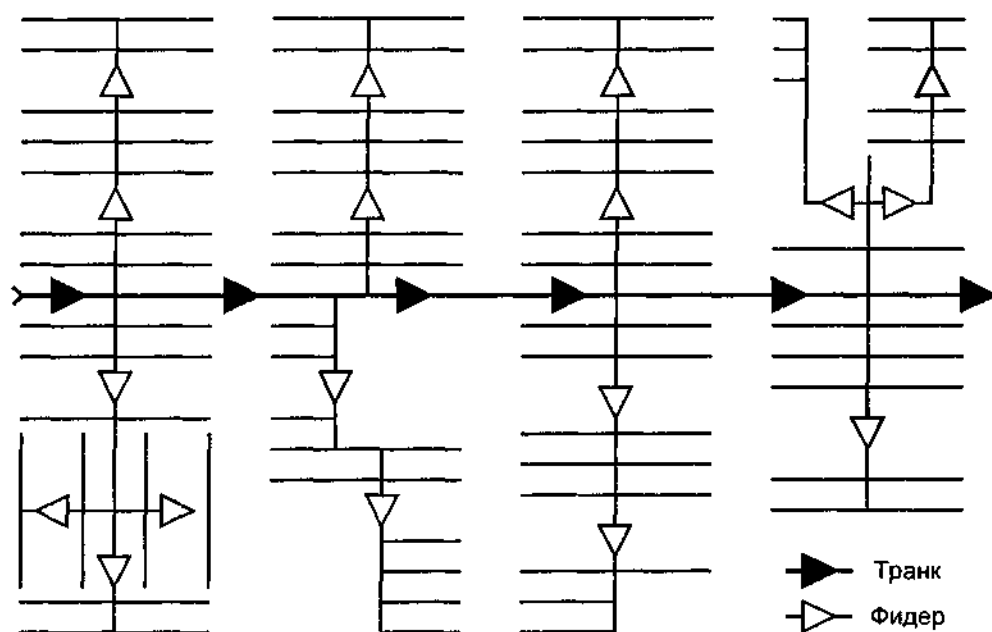


Рис. 16.4. Магистральная распределительная сеть транк-фидер

Магистральная сеть объединяет отдельные домовые сети. Она содержит основной кабельный маршрут и множество сервисных ответвлений, к которым через определенные интервалы подключены домовые сети с помощью магистральных ответвителей. Как правило, транк включает каскад транковых усилителей, ограниченный по длине 20 – 25 усилителями. Все транковые усилители имеют не очень высокое усиление (от 22 до 26 дБ) и работают при умеренных выходных уровнях. Можно предположить, что именно в этой ситуации выгоднее использовать меньше усилителей с более высоким усилением. Однако, объективные ограничения не позволяют этого сделать.

Заметим, что между любым окончанием фидерного кабеля и транком расположено не более двух фидерных усилителей. Это ограничение является типичным для фидерной подсистемы. В действительности между ними может быть установлено до трех усилителей, это справедливо для случая использования схемы с активным фидером, когда каждый фидерный кабель подключается в транк с помощью транкового усилителя мостового типа (не показано на схеме 16.4). В случае

построения сети по схеме пассивного фидера между транком и окончанием фидера находится всего два усилителя. Однако зачастую в пассивной фидерной подсистеме устанавливается только один усилитель (или два в схеме с активным фидером), обслуживающий многоквартирный дом. Это ограничение может потребовать сооружения дополнительной магистрали для охвата некоторых участков распределительной сети. Построение каскада, включающего четыре усилителя (один мостовой и три фидерных) не рекомендуется. Исключением являются крайне затруднительные или нестандартные ситуации, например, при необходимости продолжения фидера или создания дополнительной структуры в необычных географических условиях, например, в условиях пересеченной местности, где есть реки или большие возвышенности. В таком случае выходные уровни на всех фидерных усилителях должны быть снижены.

Хотя на первый взгляд кажется, что в транке должно использоваться большое усиление, поскольку сигналы в нем передаются на значительное расстояние, но в действительности это не так. Высокое усиление подразумевает либо слабый входной сигнал (и соответственно плохое значение C/N), либо сильные выходные сигналы (и следовательно плохое значение интермодуляции) или то и другое вместе. Транковая подсистема характеризуется высокой плотностью ответвлений и очень большой ответвляемой нагрузкой. Под этим подразумевается, что ответвители на всем протяжении магистральной линии устанавливаются очень часто и равномерно распределены по всему транковому кабелю. В этих условиях эффективность ответвлений может быть существенно улучшена, если сохраняются высокие рабочие уровни сигналов на протяжении всего фидерного кабеля. Однако, поддержание высоких уровней в фидерных кабелях требует повышения выходных рабочих уровней на всех фидерных усилителях, а это, как уже известно, сопровождается ростом интермодуляции. Чтобы сделать интермодуляцию в фидерном кабеле приемлемой, в транковом кабеле интермодуляция должна быть очень незначительной, а для этого выходные рабочие уровни в транке выбираются низкими. В противном случае, при высоких уровнях сигналов в транке искажения становятся настолько значительными, что разработчик вынужден мириться с высокой стоимостью транковой подсистемы, работающей при низких уровнях сигналов. При низких искажениях в транке можно использовать в фидерных кабелях усилители с высоким усилением. Таким образом, неизбежное удорожание транковой подсистемы оправдывается преимуществами использования высоких уровней в фидерной подсистеме. В каждом фидерном ответвлении сокращается необходимое количество усилителей и в результате получается существенная экономия для всей магистральной системы в целом.

Фидерные усилители создают высокие уровни, но в то же время и высокие искажения. Как правило, в фидерных усилителях не обеспечивается ни автоматической регулировки усиления (APУ) ни автоматической регулировки наклона (АРН) с целью экономии. Эти устройства обычно имеют невысокую стоимость. Учитывая отсутствие авторегулировки в фидерной подсистеме, необходимо обеспечить более высокую степень авторегулировки в транковой структуре, то установить в транке большее количество усилителей с APУ (АРН). Если, например, при использовании APУ только на каждом третьем транковом усилителе, то некоторые участки фидерной сети могут оказаться удаленными от устройств регулировки на пять усилителей (два транковых, один мостовой и два фидерных). Такой авторегулировки может быть недостаточно для гарантии ка-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

чества передачи в окончании системы при крайних температурах. Это тем более существенно, когда высока канальная нагрузка системы, которая сейчас может достигать 50 каналов и более. Допустимая величина отклонений уровней передачи в этих условиях снижается и, по этой причине, сегодня более правильным считается обеспечивать авторегулировку на каждом усилителе транковой подсистемы.

И транковая, и фидерная подсистемы могут быть обладать способностью двунаправленной передачи, которую разработчик, как правило, предусматривал изначально, но возможна и последующая модернизация системы путем замены всех усилителей на двунаправленные или путем подключения дополнительных усилительных модулей обратного канала.

Подведем предварительные итоги. При проектировании транковой подсистемы намеренно жертвуем экономичностью системы для снижения интермодуляционных искажений в транке. Тем самым, резервируем некоторый ресурс допустимости искажений в фидере, чтобы фидерные усилители могли работать при высоких уровнях и вносимая, но показатели системы в целом оставались в допустимых пределах, несмотря на значительная вносимую ими интермодуляцию. Таким образом, при правильном расчете искажения в конечных точках распределительной структуры транк-фидер остаются в допустимых пределах, во-первых, из-за того, что ограничены интермодуляционные искажения на всех транковых усилителях посредством умеренно низких выходных уровней, а во-вторых, из-за ограничения длины каскада в фидере. Систему транк-фидер нельзя рассматривать как единую структуру с общим подходом к выбору оборудования, усилению, возможной протяженности каскада и значениям уровней передачи. Напротив, следует различать уровни передачи в транке и в фидере. Техническая поддержка таких систем, разумеется, более сложна, как с точки зрения логистики, так и с точки зрения квалификации обслуживающего персонала. Принцип транк-фидер дает наибольший экономический эффект при построении больших распределительных сетей. Далее дадим краткую характеристику транковой и фидерной подсистемам и рассмотрим отдельно проблемы их проектирования, а также методику их комбинирования.

16.3. Расчет показателей транковой подсистемы

Чтобы оценить показатели качества системы транк-фидер в целом и их соответствие окончательным спецификациям, необходимо сперва оценить показатели качества каждой подсистемы в отдельности. Показатели всей системы будут удовлетворять требованиям только если разработчик правильно распределил шум и интермодуляционные искажения между транковой и фидерной подсистемами. Определим произвольно, что в окончательных точках системы значение показателя C/N должно составлять 44 дБ, а значение показателя СХМ должно составлять 51 дБ. Теперь нужно определить рабочие уровни сигналов для отдельных блоков в транковой и фидерной подсистемах.

Во-первых, необходимо рассчитать каскад усилителей, который должен достигать самой удаленной точки на маршруте транка. Конечно, этот расчет будет только оценкой, но если маршрут транка уже определен картами сетевых маршрутов, то оценка получится достаточно точной. Заметим, что при расчете самого длинного транка (и самого протяженного каскада транковых усилителей) следует предусмотреть последующее возможное расширение транка, а не

16.3. Расчет показателей транковой подсистемы

только учесть ту структуру, которая будет построена первоначально. Необходимо также выбрать усиление транковых усилителей, которые предполагается использовать, и если понадобится изменить этот параметр с целью улучшения характеристик сети.

Поскольку фидерные усилители будут работать при довольно высоких входных уровнях и их количество в каскаде будет намеренно ограничено, можно вовсе пренебречь отношением C/N фидера и считать, что отношение C/N_T транковой подсистемы равно общему комбинированному значению C/N_Σ всей системы 44 дБ. Предположим, что взятый нами транковый усилитель имеет коэффициент шума F 9 дБ и предполагаемое число усилителей в каскаде транка равно 22. Отношение C/N одного транкового усилителя будет равно:

$$C/N_{yc} = C/N_\Sigma + 10 \lg n = 44 + 10 \lg 22 = 57,4 \text{ дБ},$$

где C/N_Σ – отношение каскада усилителей транковой подсистемы, n – число усилителей в каскаде.

Тогда входной уровень сигнала, необходимый для поддержки отношения 57,4 дБ, при выбранном значении коэффициента шума транкового усилителя вычисляется следующим образом (уровень теплового порогового шума округлим до -59 дБ·мВ):

$$S_{вх} = F - 59 + C/N_{yc} = 9 - 59 + 57,4 = +7,5 \text{ дБ·мВ}.$$

При выбранном усилении усилителя 22 дБ и входном уровне +7,5 дБ·мВ выходной уровень усилителя составит +29,5 дБ·мВ. Предположим, что для данного усилителя производителем определен показатель СХМ значением 57 дБ при выходном уровне +48,5 дБ·мВ и переносимой нагрузке в 30 каналов. Вычисленный нами рабочий уровень равен +29,5 дБ·мВ, что на 19 дБ ниже определенного производителем уровня. Поскольку кроссмодуляция изменяется на 2 дБ при изменении выходного уровня на каждый 1 дБ, то уменьшение уровня на 19 дБ улучшит показатель СХМ (т.е. увеличит его) на 38 дБ. Следовательно, при выходном уровне +29,5 дБ·мВ значение СХМ составит 95 дБ.

Тогда показатель кроссмодуляции каскада из 22 блоков будет равен:

$$СХМ_\Sigma = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 95 - 20 \lg 22 = 68,2 \text{ дБ}.$$

Таким образом, показатели C/N_Σ и $СХМ_\Sigma$ данной транковой подсистемы, содержащей каскад из 22 усилителей при рабочих уровнях каждого усилителя +7,4 дБ·мВ на входе и +29,5 дБ·мВ на выходе будут равны соответственно 44 дБ и 68,2 дБ. Далее можно манипулировать входным и выходным уровнями и усилением усилителя, но прежде исследуем влияние этих параметров на фидерную подсистему.

16.4. Расчеты показателей фидерной подсистемы

Допустим, что известны показатели C/N_Σ и $СХМ_\Sigma$ системы в целом (44 дБ и 51 дБ). Теперь можно определить приемлемые значения показателей шума и кроссмодуляции отдельно для фидерной подсистемы, как было сделано это для транка. Отношением C/N для фидерной подсистемы можно пренебречь при расчете транка, поскольку оно незначительно по сравнению с шумом фидерной структуры.

Глава 16. Проектирование распределительной сети

Воспользовавшись диаграммой рис. 5.4 из гл. 5, определим, какое наибольшее значение СХМ допустимо для фидерной структуры при тех условиях, что СХМ транка равен 68,2 дБ, а наибольший СХМ всей системы транк-фидер составляет 51 дБ. Получаем, что если значение СХМ фидера выбрать равным 53 дБ, то комбинированное значение СХМ всей системы будет на 1,7 дБ хуже, чем СХМ фидера, т.е. составит 51,3 дБ. Следовательно, значение 53 дБ и является наименьшим допустимым СХМ для фидера, так как, если бы было принято, например, показатель СХМ фидера равным 52 дБ, окончательный показатель СХМ всей системы стал бы больше определенного нами значения в спецификации системы для конечной точки (51 дБ). Теперь будем так подбирать выходные уровни сигналов в фидерной подсистеме, чтобы обеспечить в ней рассчитанное значение показателя кроссмодуляции 53 дБ.

Предположим, что в спецификации фидерных усилителей определено значение показателя СХМ, равное 57 дБ при выходном уровне +52,5 дБ·мВ сигнала и передаваемой нагрузке 30 каналов. Введем стандартное ограничение для всех фидерных ветвей, допускающее в них включение не более двух фидерных усилителей, следующих за мостовым усилителем (допустим, что применяется схема активного фидера), т.е. ограничим длину фидерного каскада до трех усилителей.

Исходя из того, что СХМ всей фидерной подсистемы не может быть менее 53 дБ, определим допустимое значение СХМ каждого фидерного усилителя:

$$\text{СХМ}_{\text{ус}} = \text{СХМ}_{\Sigma} + 20 \lg N = 53 + 20 \lg 3 = 62,5 \text{ дБ.}$$

Но спецификация фидерного усилителя содержит только значение 57 дБ. Чтобы привести его к вычисленному значению 62,5 дБ, следует улучшить данное значение на 5,5 дБ. Улучшение показателя СХМ на 2 дБ является результатом уменьшения выходного уровня сигнала на 1 дБ, значит, уменьшение выходного уровня на 2,75 дБ обеспечит желаемое значение 62,5 дБ показателя СХМ на каждом усилителе. Выходной уровень, следовательно, станет равным +49,75 дБ·мВ. Округлим это значение до +50 дБ·мВ, что и будет рабочим выходным уровнем всех фидерных усилителей.

Теперь вычислим уровень на входе фидерных усилителей исходя из выбранного усиления усилителей. Например, если эти усилители имеют усиление 28 дБ, что является очень характерным примером, то при выходном уровне +50 дБ·мВ входной уровень будет составлять по крайней мере +22 дБ·мВ. Очевидно, усилители, работающие при таком высоком входном уровне будут обеспечивать хороший показатель С/Ш. По этой причине действительно можно пренебречь шумом, вносимым фидерными усилителями, тем более, что фидерный каскад содержит только три усилителя.

Хотя более длинный фидерный каскад редко встречается в фидерной подсистеме, рассмотрим влияние на показатели фидера добавления еще одного фидерного усилителя, работающего также при выходном уровне +50 дБ·мВ. В этом случае получим каскад из четырех усилителей, каждый из которых создаст кроссмодуляцию величиной 62,5 дБ. Показатель СХМ всей фидерной подсистемы тогда будет равен:

$$\text{СХМ}_{\Sigma} = \text{СХМ}_{\text{ус}} - 20 \lg N = 62,5 - 20 \lg 4 = 50,5 \text{ дБ.}$$

Этот показатель уже не удовлетворяет спецификации системы и комбинировать его со значением СХМ транка (68,2 дБ) не имеет смысла, поскольку об-

щий показатель СХМ системы станет еще ниже (49,5 дБ). Из этого расчета следует, что всякий раз, когда нарушается правило разрешающее, устанавливать не более трех усилителя в каскаде фидера (один мостовой плюс два фидерных), необходимо уменьшать выходной уровень всех фидерных усилителей по крайней мере на 3 дБ для того, чтобы поддерживать приемлемое значение СХМ в окончании расширенной фидерной ветви. Нельзя также произвольно добавлять усилитель в любое место действующей фидерной ветви перестройки усилительных участков и, возможно, замены некоторых абонентских ответвителей.

16.5. Комбинирование транковой и фидерной подсистем

Обобщим все сказанное, касающееся построения системы по принципу транк-фидер и вычислим комбинированные показатели, которые будет иметь эта система в результате объединения транковой и фидерной подсистем.

Транковая подсистема проектируется с использованием усилителей с относительно низким усилением, обычно около 24 дБ, и умеренными уровнями передачи, а также с применением высококачественного кабеля большого диаметра, характеризуемого малыми потерями (около 5 – 9 дБ на 100 м на частоте 900 МГц). По этой причине транковая подсистема имеет довольно высокую стоимость. Поскольку транковая структура включает множество усилителей, включенных каскадно и работающих при относительно низких уровнях сигналов, то наиболее критичным показателем для транка является отношение С/Н. Транк является частью системы передачи, вносящей основную долю шума. Низкое усиление и умеренные выходные уровни сигналов ограничивают нелинейные искажения в транке. Транк проектируется с заведомо лучшими показателями качества передачи, поэтому кроссмодуляция и продукты интермодуляции в самой удаленной точке транка будут значительно лучше, чем требует спецификация системы для абонентской точки.

Фидерная структура характеризуется высокими рабочими уровнями передачи и ограниченной протяженностью. Поэтому фидерная структура создает незначительное количество шума, но вносит в систему значительную долю интермодуляционных искажений. Из-за ограничения длины кабелей и крайне редкого применения устройств авторегулировки повышается экономичность фидерной сети. Кроме того, благодаря использованию в фидерной подсистеме более высоких уровней передачи становится возможным применять фидерные более дешевый кабель меньшего диаметра и снизить тем самым стоимость сети, хотя потери передачи при этом возрастают. Мостовые усилители рассматриваются как часть фидерной подсистемы. Именно с помощью мостовых усилителей сигнал ответвляется в фидерную подсистему с более высоким уровнем передачи, чем был в транке.

При необходимости увеличить область обслуживания системы КТВ расширение транковой подсистемы возможно до разумных пределов, если первоначальный проект допускал такое последующее расширение. Возможность расширения фидерного распределительного кабеля, наоборот, строго ограничена, поскольку первоначальный проект допускает только номинальное значение вносимой интермодуляции из фидера. Можно при первоначальном проектировании фидерной подсистемы обеспечить некоторый резерв для расширения отдельных фидерных ветвей, но это потребует снижения рабо-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

чих уровней вдоль всего фидера для гарантии того, что вносимая расширением кроссмодуляция и интермодуляция не превысит изначально заложенную в проект величину.

Приведем перечень типов оборудования, которое может включать система КТВ, имеющая структуру транк-фидер.

1. Транковые усилители с ручной регулировкой
2. Транковые усилители с авторегулировкой
3. Мостовые усилители
4. Промежуточные мостовые усилители
5. Терминирующие мостовые усилители
6. Фидерные усилители

В системе транк-фидер следует различать следующие уровни передачи:

- выходные уровни транковых усилителей,
- выходные уровни мостовых усилителей,
- выходные уровни фидерных усилителей в каскаде из 2 усилителей,
- выходные уровни фидерных усилителей в каскаде из 3 усилителей.

Показатели системы в целом определяются методом комбинирования транковой и фидерной структур, который был рассмотрен в первых главах. Передача сигнала в распределительной системе типа транк-фидер осуществляется через транк к точке подключения фидера, где уровень сигнала повышается мостовым усилителем. Затем сигнал попадает в фидерную подсистему и проходит через строго ограниченное количество фидерных усилителей. Показатели качества передачи на абонентских окончаниях определяются комбинированием значений шума и интермодуляции, вносимых обеими подсистемами. Приведем результаты комбинирования транковой и фидерной подсистем с расчетом показателей всей системы.

Транковые усилители

Входной уровень сигнала.....	+7,5 дБ·мВ
Выходной уровень сигнала.....	+29,5 дБ·мВ
Отношение C/N.....	57,5 дБ
Показатель СХМ.....	95,0 дБ

Фидерные усилители

Входной уровень сигнала.....	+22,0 дБ·мВ
Выходной уровень сигнала.....	+50,0 дБ·мВ
Отношение C/N.....	Не значительно
Показатель СХМ.....	62,5 дБ

Каскад из 22 транковых усилителей будет производить следующие показатели в окончании транка:

$$C/N_T = C/N_{yc} - 10 \lg N = 57,5 - 10 \lg 22 = 44,0 \text{ дБ},$$

$$X_{M_T} = C_{X_{M_{yc}}} - 20 \lg N = 95,0 - 20 \lg 22 = 68,2 \text{ дБ}.$$

Каскад из 3 фидерных усилителей будет производить следующие показатели в окончании фидера:

$$X_{M_\Phi} = C_{X_{M_{yc}}} - 20 \lg N = 62,5 - 20 \lg 3 = 53,0 \text{ дБ},$$

C/N_Φ – не учитывается из-за высоких входных уровней.

16.5. Комбинирование транковой и фидерной подсистем

Комбинирование показателей СХМ транка (68,2 дБ) и фидера (53,0 дБ) дает значение 51,6 дБ, которое находится в соответствии с требованиями спецификации. Показатель C/N транка (44 дБ), который принимаем за показатель C/N всей системы, также соответствует требованиям.

Расчет для значительной канальной нагрузки (более 50 каналов) следует проводить, учитывая и другие виды интермодуляционных искажений, т.е. не только кроссмодуляцию, но и комбинационные искажения третьего порядка (СТВ), а сама методика расчета будет также основана на комбинировании показателей и сравнении результата с допустимыми значениями окончательной спецификации.

16.6. Проектирование сети малого масштаба

В системах небольшого масштаба и СКПТ местная головная станция связана с домовой распределительной сетью через магистральную кабель. В малых СКПТ даже магистральная система может отсутствовать, а головная станция непосредственно подключается к домовой сети. Такие системы имеют право на существование в тех случаях, когда нерентабельно создавать большую систему КТВ, а эффект от создания системы малого масштаба будет гораздо выше. Например, в сельской местности СКПТ может обслуживать поселок или небольшой город. Для создания такой системы может быть достаточно одного каскада усилителей, т.е. одного кабельного маршрута. Логично при этом рассматривать всю систему как одиночный кабель, содержащий каскад однотипных усилителей. Требования к усилителям в этом случае будут значительно менее строгими, чем для магистрали.

Допустим, нагрузка в обслуживаемой области распределена так, что вдоль магистрали расположены небольшие группы (кластеры) абонентов и многоквартирные дома, а отдельные абоненты и малые разрозненные группы абонентов. В условиях такой малой и неравномерно распределенной нагрузки преимущества от построения системы по принципу транк-фидер оказываются очень незначительными или даже, более того, снижают эффективность проекта. Поскольку протяженность области обслуживания может быть достаточно большой (более 15 км) при малой ответвленной нагрузке, то затраты на создание протяженной транковой подсистемы с высокими показателями качества могут стать неоправданно высокими по сравнению с экономической отдачей от проекта. Фидерный кабель, расположенный параллельно транковому для включения ответвителей, в этой ситуации также является излишней и дорогой структурой.

Даже если плотность абонентов в некоторых сегментах области обслуживания такова, что предпочтителен подход транк-фидер, то соотношение количества таких сегментов к общему объему области с малой плотностью населения сделает незаметным возможное преимущество. Кроме того, применение разных подходов к проектированию в отдельных сегментах одной области обслуживания невыгодно с точки зрения логистики и технического обслуживания системы, которые усложняются при введении нескольких различных типов оборудования в одной системе. Например, если в системе используется каскад из 250 усилителей на протяжении 100 км и только три мостовых усилителя и 10 фидерных усилителей, то преимущество будет сомнительным. Основным недостатком всех небольших систем КТВ является их низкая экономическая эф-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

фективность, связанная с ограниченностью прибыли от их эксплуатации, так как большая кабельная структура должна обслуживать строго ограниченное количество абонентов.

Усилители в системе малого масштаба расположены дальше друг от друга и общая область охвата или длина кабельного маршрута будет значительно больше. Если применить принцип транк-фидер для проектирования в условиях области с низкой плотностью нагрузки, то можно увеличить длины участков только путем перераспределения всех имеющихся в системе искажений вдоль системы, а не путем резервирования роста искажений для расширения системы. Если, принимая эту концепцию, не увеличить уровни на входах усилителей, то не сможем достичь требуемой протяженности каскада. Показатель C/N в окончании системы при этом в наихудшем случае будет идентичен показателю шума системы транк-фидер. Применение методов проектирования городской фидерной сети в этих условиях просто невозможно, потому что включение даже трех усилителей, работающих при высоких выходных уровнях, нарушило бы спецификации системы по показателю кроссмодуляции. Очевидно, что не невозможно включить в каскад значительное число усилителей без серьезного снижения выходных уровней, а это не позволит компенсировать возросшие потери в кабеле. Следовательно, единственным выходом остается идея создания такой распределительной системы, в которой сочетались бы одновременно принципы транка и фидера, т.е. непосредственно в магистральную линию включались абонентские ответвители.

Однако это не означает, что на некоторых участках сети нельзя использовать параллельный кабель, который широко использовался в системах, построенных по принципу транк-фидер. Если прокладка вторичного параллельного кабеля позволяет достичь значительных технических или экономических преимуществ, то его можно и необходимо использовать, но такое решение принимается только на основе расчета. В отдельных местах необходимость прокладки параллельного кабеля диктуется низкими входными уровнями сигналов на усилителях, что наводит на мысль о применении здесь кабеля обратной связи. Если длина магистрали велика и распределение абонентских ответвителей вдоль нее являются слишком плотным, то правильнее будет разгрузить магистраль путем сбрасывания некоторых ответвителей на параллельный кабель. Например, в городских сегментах области обслуживания размещение параллельного кабеля вполне допустимо. Таким образом, можно сбросить ответвительную нагрузку с магистрали на участках с высокой плотностью ответвителей, резервируя, тем самым, нагрузку для участков с низкой плотностью ответвителей. Но в таком случае во вторичном кабеле не будет происходить повышения уровней передачи, поэтому этот способ не имеет ничего общего с включением фидерного кабеля.

Используемая здесь терминология выбрана как наиболее понятная и адекватно отражающая суть данной методики проектирования. В литературе можно встретить и другие ее названия, например "ответвленный транк" (tapped trunk), но оно может вносить путаницу, особенно, когда в некоторых случаях могут одинаково успешно применяться обе методики (один кабель транк-фидер) в разных частях одной системы. Термин "распределенные искажения" (distributed distortion) более правильно описывает смысл методики, но кажется несколько неудобным. Поэтому за неимением лучшего был выбран термин "один кабель", хотя он и не вполне соответствует действительности, поскольку

иногда можно подключать параллельно первичному кабелю короткие участки вторичного кабеля с целью развязки ответвителей и сбрасывания нагрузки.

16.7. Распределительная сеть на основе одного кабеля

Наиболее экономически эффективным подходом в условиях системы малого масштаба будет прокладывание одного коаксиального кабеля для совмещения функций транковой и фидерной подсистем. Один кабель будет использоваться как для передачи сигналов (функция транка), так и для подключения ответвителей нагрузки (функция фидера). Эта концепция не предполагает использование в качестве основных рабочих уровней передачи в основном кабеле умеренных уровней (как было для транка), а означает смещение выходных уровней ближе к рабочим уровням фидерных усилителей и использование более высокого усиления. На этом пути возникают свои особенности. Если вносимые шумы и интермодуляция распределяются по единственному кабелю, то система будет работать с более высокими искажениями, чем транк, но с меньшими искажениями, чем фидер системы транк-фидер. Показатель шума однокабельной системы будет выше, чем для фидера, но ниже, чем для транка. В основном снижение стоимости проекта сети происходит за счет отказа от протяженной и разветвленной фидерной структуры, но кроме этого можно расширить усилительные участки, разнося усилители дальше друг от друга и используя меньше блоков, чем в городской транковой подсистеме. Небольшая часть системы на основе одного кабеля показана на рис. 16.5.

Низкая экономичность систем малого масштаба заставляет идти на любое возможное сокращение затрат на ее строительство. Для этого разработчик должен сперва исследовать возможность ослабления спецификаций в окончаниях системы и убедиться, что это не сильно скажется на работоспособности всей системы.

Другими словами, разработчик может намеренно пойти на незначительное и контролируемое ухудшение показателей в некоторых, наиболее удаленных, точках системы, чтобы уменьшить стоимость сети. Заметим, что допускается ухудшение качества в крайних точках системы только, если они составляют лишь очень небольшой процент от общего числа абонентов. Считается, что требования к окончательным показателям системы в таком случае можно смягчить до 40 дБ для отношения C/N и до 50 дБ для значения СХМ без серьезного влияния на качество обслуживания, однако эти значения не стоит воспринимать как рекомендацию. При таких значениях в окончании системы можно создать каскад из 40 усилителей, которые использовались в предыдущих примерах. Тогда в оконечной точке отношение C/N будет равно 42,9 дБ, а СХМ будет равен 50 дБ. Снизив рабочие уровни на 0,5 дБ, можно увеличить каскад до 45 усилителей, при этом полностью оставаясь в рамках требований. Каскад из 45 блоков будет иметь длину около 29 километров, учитывая потери, вносимые ответвителями и делителями.

Сделаем расчет показателей однокабельной системы при вышеназванных предположениях. Произвольно определим к ней следующими значениями.

Спецификация системы

Оконечное отношение C/N	40 дБ
Оконечный показатель СХМ.....	50 дБ

Глава 16. Проектирование распределительной сети

Спецификация усилителя

Входной рабочий уровень	+8 дБ·мВ
Выходной рабочий уровень	+40 дБ·мВ
Отношение С/Ш	59 дБ
Показатель СХМ	82 дБ

Характеристики системы

Канальная нагрузка	21 канал
Плотность нагрузки	3 ответвителя на км (ответвители на 2)
Протяженность системы	25 км

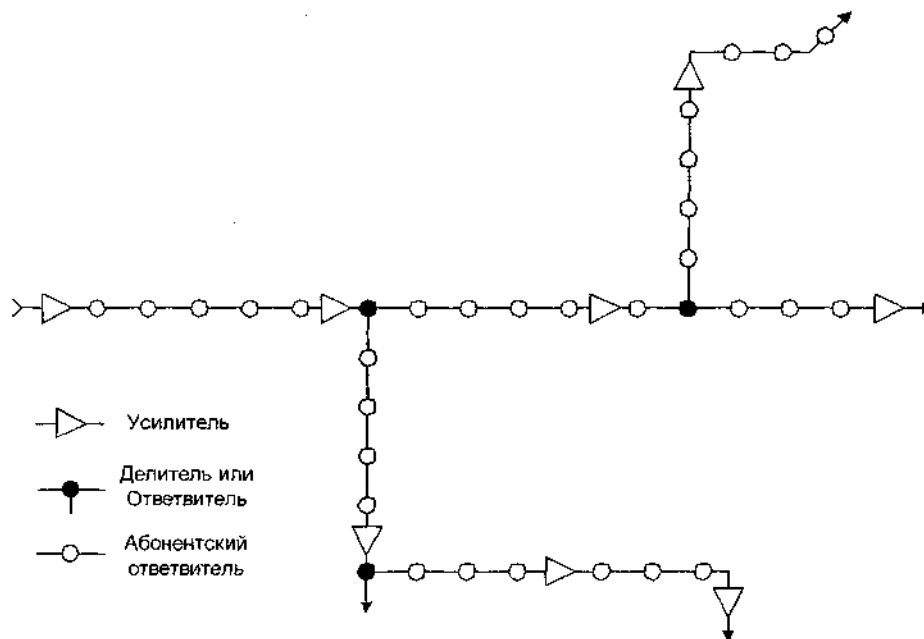


Рис. 16.5. Распределительная сеть на основе одного кабеля

Предположим, что в среднем один ответвитель будет вносить потери 1,4 дБ и на каждом кабельном участке будет включено в среднем 2,5 ответвителя на протяжении всей системы. Общие вносимые ответвителями потери между на каждом участке будут тогда составлять $2,5 \times 1,4 = 3,5$ дБ. Предположим также, что потери на делитель/ответвитель в среднем будут равны 1,5 дБ на кабельный участок вдоль всей системы, что является очень консервативной оценкой. Зарезервируем ответвительную нагрузку в 1 дБ для последующего расширения системы. Следовательно, суммарные «некабельные» потери на участке (в делителях, ответвителях плюс резервирование = $3,5 + 1,5 + 1$) составляют 6,0 дБ. Выберем кабель с потерями 3,46 дБ на 100 м на частоте 50 МГц.

При данных уровнях +8 дБ·мВ на входе и +40 дБ·мВ на выходе усиление будет равно 32 дБ. Вычитая из него 6 дБ общих потерь, не связанных с кабелем, получаем, что каждый усилительный участок может быть образован отрезками кабеля, вносящими потери 26 дБ. При выбранном кабеле длина участка,

16.7. Распределительная сеть на основе одного кабеля

имеющего потери 26 дБ, будет составлять 750 м или, иначе говоря, магистральные усилители будут отстоять друг от друга на 750 м. Тогда для создания системы общей протяженностью 25 км потребуется 33,3 усилителя, что округляется в большую сторону до 34.

Показатели C/N и СХМ в окончании каскада из 34 усилителей можно определить следующим образом:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N = 59 - 10 \lg 34 = 43,7 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 82 - 20 \lg 34 = 51,4 \text{ дБ}.$$

Полученные показатели лучшие, чем это требует спецификация системы. Поэтому можно, манипулируя рабочими уровнями сигнала, увеличить действительную протяженность системы, оставаясь в рамках спецификации. Уменьшая входной уровень на 1 дБ до значения +7 дБ·мВ, снижаем и выходной уровень до +39 дБ·мВ. Это ухудшает отношение C/N каждого усилителя с 59 дБ до 58 дБ, но улучшит показатель СХМ с 82 дБ до 84 дБ. Несложный расчет покажет, что тогда система может быть расширена до 45 усилителей (общая протяженность 33 км) и ее показатели будут равны:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N = 58 - 10 \lg 45 = 41,5 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 84 - 20 \lg 45 = 50,9 \text{ дБ}.$$

И снова оба параметра оказались несколько лучше, чем требует спецификация, но дальнейшее увеличение протяженности системы будет уже невозможно. Это легко проверить, добавив в каскад еще один усилитель

В этих расчетах для простоты не учитывалась широкополосность системы передачи. Далее исследовано влияние на показатели системы значения верхней граничной частоты передачи. Можно предположить, что в аналогичной однокабельной системе, но с верхней частотой 900 МГц (с общей канальной нагрузкой более 50 каналов), кроссмодуляция усилителей будет много выше. Поэтому можно просто взять худшее значение СХМ усилителя, поддерживая прежний выходной уровень +40 дБ·мВ, или, наоборот, снизить выходной уровень на 3 дБ, сохранив старое значение СХМ, равное 82 дБ, и пересчитать показатели системы. Как вариант можно использовать кабель большего размера с меньшими потерями. Выберем способ уменьшения выходного уровня до значения +37 дБ·мВ.

На более высоких частотах потери в кабеле, как известно, увеличиваются. Предположим, что все "некабельные" потери также возросли от предыдущего значения 6 дБ до 7 дБ. Тогда, при коэффициенте передачи усилителя 29 дБ, который определяется разностью между +37 дБ·мВ и +8 дБ·мВ, получим, что усиление на участке равно 22 дБ. Используя тот же кабель, потери в котором на частоте 900 МГц составляют, предположим, 4,2 дБ на 100 м, найдем, что расстояния между усилителями уменьшились до 530 м.

Для построения системы длиной 25 километров теперь потребуется 47,7 усилителей, что округляется до 48. Показатели каскада из 48 усилителей при выбранных рабочих уровнях +8 дБ·мВ и +37 дБ·мВ будут равны:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N = 59 - 10 \lg 48 = 42,1 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 82 - 20 \lg 48 = 48,4 \text{ дБ}.$$

Глава 16. Проектирование распределительной сети

Заметим, что полученный показатель СХМ сейчас не соответствует требованию спецификации (50 дБ). Следовательно, необходимо понизить рабочие уровни на 1 дБ, как делали раньше, и, тогда, получим:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N = 58 - 10 \lg 48 = 41,2 \text{ дБ},$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 84 - 20 \lg 48 = 50,4 \text{ дБ}.$$

Теперь результаты полностью удовлетворяют требованиям, но уже невозможно расширить систему без принятия некоторых специальных мер. Этими мерами могут быть, например, снижение вносимых ответвителями потерь путем разумного "сбрасывания" части ответвленной нагрузки на параллельный вторичный кабель или использование другого типа кабеля большего диаметра с меньшими потерями. Таким образом, при данной ответвленной нагрузке, данных потерях на делителях/ответвителях и данном типе кабеля система передачи с полосой частот до 900 МГц требует 48 усилителей в каскаде, тогда как узкополосная система с менее высокой граничной частотой потребовала бы только 45 усилителей. При строительстве системы это отразится на стоимости. Грубая оценка показывает, что изменение канальной нагрузки с 21 до 50 каналов вызывает увеличение стоимости строительства системы на 25...35 %.

Сама по себе методика "одного кабеля" не накладывает каких-либо технических ограничений на реализацию системы. На высоких частотах, использование которых необходимо для расширения полосы передачи, потери передачи будут больше, но связанные с этим ограничения в той же степени относятся и к методике транк-фидер. Более того, системы меньшего размера обычно не требуют значительной полосы передачи, поскольку абонентская база у них мала и прибыль незначительна. Более широкая полоса подразумевает большее число передаваемых сигналов, и, как следствие, более сильные интермодуляционные искажения. Следовательно, система с более широкой полосой будет требовать более близкого расположения усилителей и больших затрат на строительство.

Но все же некоторые специфические проблемы присущи однокабельной методике. Поскольку множество приборов, среди которых усилители, делители, ответвители, включается в единственный коаксиальный кабель, разработчик вынужден учитывать механическую прочность и надежность структуры с большим числом кабельных разъемов.

При большой протяженности каскада, в котором количество усилителей и пассивных приборов достигает нескольких сотен, неизбежно возникает вопрос надежности оборудования. Однако, по некоторым характерным параметрам надежность системы на основе одного кабеля может быть улучшена с помощью изменения конфигурации оборудования. Опыт показывает, что при установке большого процента усилителей в сети в среднем используется один или два пассивных прибора на выходе усилителя. Это могут быть направленные ответвители для подключения кабеля обратной связи, ответвители в местах близкого расположения усилителей или делители для организации расходящихся второстепенных кабельных маршрутов. Во всех случаях это может быть сделано с помощью внешних пассивных устройств, но лучше использовать здесь усилительные устройства со встроенными пассивными блоками и разъемами аналогично тому, как в мостовом усилителе реализована возможность деления сигнала по фидерным ответвлениям с помощью встроенного направленного ответвителя.

16.7. Распределительная сеть на основе одного кабеля

Другой проблемой однокабельной системы является использование в ней автоматической регулировки усиления. Можно показать, что увеличение количества устройств авторегулировки в сети до 100 % (на каждом усилителе) приведет к возникновению случайных нестабильностей уровней сигналов (так называемый эффект слежения) в окончании длинного каскада. На экране телевизора это будет вызывать эффект непрерывного мерцания или размывания изображения. Это явление проявляется при малых постоянных времени устройств АРУ. В то же время при высоких уровнях передачи, которые используются в однокабельной системе, включение АРУ необходимо.

Высокие выходные рабочие уровни в однокабельной системе используются по крайней мере по трем причинам:

1. Для повышения эффективности ответвителей и, до некоторой степени, для снижения вносимых ответвителями потерь.

2. Для возможности использования более дешевого кабеля меньшего диаметра, несмотря на более высокие потери.

3. Для увеличения протяженности усилительных участков и длин отрезков кабеля обратной связи.

Как правило, более высокому усилению всегда сопутствует какое-то увеличение длин усилительных участков. В длинных кабельных участках отклонение уровней передачи, вызванное температурными изменениями, будет возрастать, поэтому в однокабельных сетях устройства АРУ или АРН следует включать более часто, чем в городских транковых сетях с короткими усилительными участками. Снабжение устройствами АРУ каждого усилителя может в большой мере упростить процедуру технического обслуживания системы.

Поскольку в однокабельной системе нет деления на транковые и фидерные усилители, логично использовать усилители одного типа. Это значительно упрощает техническое обслуживание. В системе, показанной на рис. 16.5, все усилители, где бы они ни располагались, идентичны, работают при одинаковых входных и выходных рабочих уровнях, и, следовательно, взаимозаменяемы. В такой системе легче организовать горячую замену вышедшего из строя усилителя, имея в качестве резервного блока всего один усилитель, настроенный на работу при известных уровнях сигнала. Тогда восстановление обслуживания в случае отказа усилителя, может осуществляться простым включением резервного модуля без какой-либо дополнительной настройки в этой точке. Разумеется, для локализации нерабочего блока в системе необходимо еще специальное тестирующее оборудование.

16.8. Сравнение методик по техническим показателям

Сопоставим возможности проектирования систем малого масштаба с применением возможных методик: методики транк-фидер и методики одного кабеля. Предположим, что оконечная спецификация системы является общей для всех трех проектов, и определена значениями 44 дБ показателя С/Н и 51 дБ показателя СХМ. Для упрощения расчета не будем учитывать потери в ответвителях и делителях. Характеристики усилителя при 30-канальной нагрузке представлены в табл. 16.1 для трех вариантов проекта.

При таких характеристиках усилителя вычислим показатели, которые будет иметь каскад усилителей в системе, построенной по методике транк-фидер.

Показатели качества, создаваемые каскадом из 22 транковых усилителей:

Таблица 16.1

Сравнение методик по уровням сигнала

Показатель	Транк-фидер		Один кабель
	Транковый усилитель	Фидерный усилитель	
Входной уровень	+7,5 дБ·мВ	+22,0 дБ·мВ	+8,0 дБ·мВ
Выходной уровень	+29,5 дБ·мВ	+50 дБ·мВ	+40,0 дБ·мВ
Усиление участка	22,0 дБ	28,0 дБ	32,0 дБ
Отношение С/Н	57,5 дБ	*	59,0 дБ
Показатель СХМ	95,0 дБ	62,5 дБ	82,0 дБ

Примечание: * – значение С/Н фидера можно не учитывать из-за высоких входных уровней и малого числа фидерных усилителей.

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{т.ус} - 10 \lg N = 57,5 - 10 \lg 22 = 44 \text{ дБ,}$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{т.ус} - 20 \lg N = 95 - 20 \lg 22 = 68,2 \text{ дБ.}$$

Показатели качества, создаваемое каскадом из 4 фидерных усилителей:

$$СХМ_{ф.Σ} = СХМ_{ф.ус} - 20 \lg N = 62,5 - 20 \lg 4 = 50,5 \text{ дБ.}$$

Вычисление значения С/Н фидерного каскада не требуется из-за высоких входных уровней на усилителях.

Теперь при тех же характеристиках усилителя вычислим показатели, которые будет иметь каскад усилителей в системе, построенной по методике одного кабеля.

Показатели качества, создаваемые каскадом из 33 усилителей:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{ус} - 10 \lg N = 59 - 10 \lg 33 = 44 \text{ дБ,}$$

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{ус} - 20 \lg N = 82 - 20 \lg 33 = 51,6 \text{ дБ.}$$

Сравним полученные результаты, предполагая, что потери в кабеле составляют в обоих случаях 4,3 дБ на 100 м. Результаты сравнения представлены в табл. 16.2.

Хотя во обоих вариантах получены окончательные показатели, соответствующие спецификации, вариант на основе единственного кабеля позволяет достичь большей протяженности системы, т.е. обслуживать большую область (22,55 км в длину).

Таблица 16.2

Сравнение методик по протяженности каскада

Показатель	Методика проектирования		
	Транк-фидер		Один кабель (весь каскад)
	транковая	фидерная	
Усилителей в каскаде	22	4	33
Усиление участка	22 дБ	28 дБ	32 дБ

16.8. Сравнение методик по техническим показателям

Показатель	Методика проектирования		
	Транк-фидер		Один кабель (весь каскад)
	транковая	фидерная	
Протяженность участка	512 м	651 м	744 м
Общая протяженность	11,26 км	2,6 км	24,55 км
Отношение С/Н	44 дБ	*	44 дБ
Показатель СХМ	68,2 дБ	50,5 дБ	51,6 дБ

Примечание: * – значение С/Н фидера можно не учитывать из-за высоких входных уровней и малого числа фидерных усилителей.

Очевидно, при применении в действительности этой методики проектирования системы невозможно достигнуть такой протяженности, поскольку включение абонентских ответвителей, направленных ответвителей и делителей снизит усиление каждого участка и, соответственно, уменьшит длину участков, но это в равной степени относится и к другой методике. Можно немного улучшить реализацию проекта с одним кабелем, поскольку в нем показатель СХМ на 0,6 дБ лучше требуемого, что позволит слегка повысить входные и выходные уровни.

16.9. Комбинированная распределительная сеть

Существуют такие условия, в которых наилучший результат дает комбинирование двух методик проектирования – методики транк-фидер и методики одного кабеля. Примером таких условий является протяженная сеть, проходящая в основном по территории с малой плотностью населения, но встречающая на своем пути районы с более высокой плотностью населения, например, небольшие города или поселки городского типа. Такой участок “городского типа” может являться областным центром данной местности и содержать не менее 1000 жилых зданий, располагаясь недалеко от географического центра обслуживаемой области. Рядом с городским участком имеет смысл установить головную станцию. Очевидно, основная распределительная сеть в таком случае должна быть построена по методике одного кабеля, а на участках застройки городского типа, особенно при их значительных размерах, более подойдет методика транк-фидер. Такую систему можно рассматривать как систему смешанного типа. Методика создания магистрали на основе одного кабеля в действительности уменьшает эффективность использования ответвителей, но в небольших, малобюджетных системах экономичность долговременной эксплуатации может быть также важна, как и стоимость первоначального строительства. Наиболее важен, однако, тот факт, что те экономические преимущества, которые способна предоставить методика транк/фидер, не могут быть широко и в полной мере использованы в небольших системах, поскольку в этом случае имеется только номинальная ответвительная нагрузка.

Помня об этом, рассмотрим модификацию методики на основе одного кабеля путем изменения рабочих уровней сигналов с целью повышения эффективности ответвительной нагрузки в городских сегментах системы, по-прежнему используя во всей системе усилители только одного типа. Даже если на городских участках нужно будет ввести другие рабочие уровни, использование тех же усилителей будет выгодно по соображениям стандартизации оборудования.

Глава 16. Проектирование распределительной сети

Стандартное оборудование требует менее сложной материально-технической поддержки, как в смысле логистики, так и в смысле упрощения процедур настройки и тестирования, поэтому не смотря на то, что в рассматриваемой системе смешанного типа городские сегменты будут очень малы по сравнению с общей протяженностью структуры, все-таки можно минимизировать их стоимость. Проект транк-фидер требует применения разнообразных типов оборудования и введения нескольких различных уровней передачи. Так, в дополнение к двум типам транковых усилителей (с ручной и автоматической регулировкой) понадобилось бы два или три типа мостовых усилителей, а также фидерные усилители. Основным состав оборудования, следовательно, включал бы по крайней мере пять разных типов по сравнению с двумя типами в однокабельном проекте. Другими словами, если выбрать различные типы усилителей для городских и внегородских сегментов рассматриваемой распределительной сети, то не получаем выигрыша по стоимости в сравнении с методикой транк-фидер.

В примере построения проекте однокабельной системы ранее использовались усилители с коэффициентом усиления 32 дБ и выходным рабочим уровнем +40 дБ·мВ. Этот выходной уровень был выбран в соответствии с относительно большой длиной кабельного маршрута системы, которую нужно было построить. Но поскольку теперь принято решение разместить с головную станцию рядом с областным центром, можно увеличить этот выходной уровень, не нарушая при этом окончательные спецификации системы. Посмотрим, что произойдет, если поступим именно таким образом, не изменяя при этом усиление усилителя. При выходном уровне +40 дБ·мВ и нагрузке в 21 канал усилитель создает кроссмодуляцию 83 дБ. Так как СХМ будет падать на 2 дБ при увеличении выходного уровня на каждый децибел, то если повысим уровень до +45 дБ·мВ при той же канальной нагрузке, СХМ ухудшится до значения 73 дБ. Но одновременно это повышение выходного уровня без изменения усиления вызовет улучшение отношения С/Ш на 5 дБ. Уровень +45 дБ·мВ более приближен к выходным уровням фидерных усилителей в структуре транк-фидер, а, кроме того, он значительно повышает эффективность использования ответвителей, по крайней мере в городских сегментах системы, что и было нашей целью. Что касается увеличившихся интермодуляционных искажений, они допустимы, поскольку городские сегменты ограничены по территории охвата. Следовательно, это ухудшение будет не более сильным, чем готовы допустить в конечной точке любой системы типа транк-фидер. Такой режим работы усилителей с повышенными уровнями передачи не подходит для внегородских участков кабельного маршрута, поскольку это бы существенно ограничило достижимую область обслуживания всей системы. Поэтому здесь вернемся к ранее установленным уровням +8 дБ·мВ на входе и +40 дБ·мВ на выходе, которые были выбраны как оптимальные. Тип усилителя при этом не меняем.

При выбранных уровнях передачи в разных сегментах следует определить, какое количество усилителей, работающих при повышенных выходных уровнях, можно установить в каскаде городского участка. Если спецификация системы допускает величину СХМ не менее 52 дБ, то будем устанавливать только каскад из 11 блоков, причем, показатель СХМ всего каскада будет равен:

$$СХМ_{\Sigma} = СХМ_{yc} - 20 \lg N = 73 - 20 \lg 11 = 52,5 \text{ дБ.}$$

Длина каскада из 11 усилителей, расположенных на расстоянии 580 м друг от друга, учитывая вносимые ответвителями потери, будет достигать примерно 6,3 км, что вполне достаточно охвата городского сегмента.

Дальнейшее увеличение уровня невозможно без рассмотрения влияния на протяженный внегородской сегмент системы. Трудно с точностью определить, в каких конкретных случаях может эффективно применяться оригинальная однокабельная методика проектирования, а в каких смешанная методика. Сравнительный анализ показывает, что обычно в населенных пунктах с численностью домов менее 1000 методика одного кабеля будет более экономична, но точно определить эту границу численности невозможно. Однако, можно с уверенностью сказать, что, однокабельная методика всегда более экономична во внегородских сегментах смешанной системы. Заметим, что, хотя при создании системы смешанного типа и вводится два разных уровня передачи, что несколько усложняет эксплуатацию и техническую поддержку системы, те же недостатки присущи методике транк-фидер, только в гораздо большей степени. Очевидное преимущество рассмотренной методики заключается в том, что даже при двух уровнях передачи предполагается использование идентичных усилителей на протяжении всей системы.

16.10. Расширение кабельной структуры

Стоит отдельно рассмотреть вопрос расширения кабельной структуры системы КТВ при увеличении области обслуживания. Практика, в том числе зарубежная, показывает, что многие системы КТВ, эксплуатируемые на протяжении достаточно долгого времени, продолжают сохранять потенциал роста в близлежащих областях и населенных пунктах. Расширение области обслуживания стимулируется появлением спутниковых программ, увеличением числа предлагаемых системой каналов и услуг, и, как следствие, ростом популярности и общественного интереса к кабельному телевидению. Распространение системы КТВ на прилегающие к обслуживаемой области районы может представлять собой очень привлекательную возможность получения дополнительной прибыли для операторов системы и сделает возможным обслуживание ранее недоступных групп абонентов.

Практически расширение системы может выполняться либо на основе методики транк-фидер, либо на основе одного кабеля, в зависимости от плотности населения в новых областях. Можно, конечно, растянуть область обслуживания, применяя кабель большего диаметра с меньшими потерями, но это потребует замены всего маршрута кабеля и увеличит общую стоимость строительства. Разработчик должен исследовать работоспособность расширяемой структуры при различных рабочих уровнях сигнала в расширении и найти оптимальные значения с точки зрения шума, интермодуляции и возможной длины расширения. Проектирование расширения по методике транк-фидер может не дать выигрыша для системы в целом, но использование менее дорогого однокабельного подхода почти всегда позволяет получить некоторое повышение эффективности системы, даже при создании небольшого расширения, например, из пяти усилителей. Возможно комбинирование этих двух подходов в одной системе, что дает лучшие результаты. Расширение существующей структуры следует рассматривать иначе, чем подключение дополнительной нагрузки в усилительные участки, о котором говорилось в предыдущей главе. Прежде все-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

го необходимо определить желаемую длину усилительного каскада расширения, а затем учесть вносимые потери всех требуемых пассивных приборов и ответвлений кабеля. Затем нужно установить значения показателей качества, которые можно считать допустимыми в конечных точках расширения. Эти показатели могут отличаться от показателей уже действующей структуры. Если новая область обслуживания невелика или включает небольшое количество абонентов, то требования к ее оконечным показателям можно несколько ослабить.

В любом случае, необходимо оценить показатели передачи по всей уже существующей структуре до той точки, где должно начинаться расширение. Это можно сделать путем непосредственных измерений или вычислений теми же способами, которые уже были продемонстрированы ранее. Вычисления должны учитывать все факторы, влияющие на показатели системы, как то, канальную нагрузку, входные и выходные уровни, длину усилительного каскада и так далее. Главное, что необходимо определить, это каковы значения отношения сигнала к шуму и показателя интермодуляции в той точке, из которой предполагается подавать сигнал в новую структуру. Проведем расчет с произвольно взятыми данными, чтобы показать порядок действий. Как и в предыдущих примерах, ограничимся учетом показателя СХМ, хотя системы с большой канальной нагрузкой правильнее будет рассматривать с точки зрения комбинационных частот третьего порядка (СТВ). Методика оценки в том и другом случае одинакова.

Если предположить, что точка, от которой будет питаться расширение, находится где-то на маршруте транка, а не в окончании фидерного кабеля, то можно предсказать, что в этой "фидерной" точке отношение C/N будет близко к оконечной спецификации системы, тогда как по показателю СХМ еще будем иметь резерв. Это объясняется тем, что вносимая интермодуляция была зарезервирована для расширения фидерной сети с помощью мостового усилителя и двух фидерных усилителей. Вычислив показатели системы в точке расширения, сравним их с установленными для системы оконечными показателями и определим, допустимые значения шума и интермодуляции, вносимые со стороны расширения. Например, предположим, что спецификация уже существующей системы определена значениями 43 дБ для C/N и 52 дБ для СХМ. Далее допустим, что найденное значение показателя C/N в предполагаемой точке расширения равно 46 дБ, а найденное значение СХМ равно 61 дБ. Это значит, что для любого расширения, начинающегося в этой точке, допускается ухудшение C/N не более чем на 3 дБ до значения 43 дБ, а ухудшение СХМ допускается не более чем на 9 дБ до значения 52 дБ. Действительные значения показателей в точке начала расширения будут, конечно, в большой степени зависеть от расположения этой точки в системе. Если она находится близко к головной станции, то накопленный шум и интермодуляция в ней будут невелики, что позволит создать расширение значительной протяженности. Если же она будет находиться ближе к окончанию транкового кабеля, то ее показатели могут оказаться вовсе неудовлетворительными для создания расширения.

Если на границе существующей системы размещено большое количество сервисных точек, обслуживающих значительный процент абонентов, то в граничной точке сохраняется высокое качество передачи. Если при этом расширение должно обслуживать относительно небольшое число домов, требования к показателям обслуживания в расширении можно смягчить, однако, это не следует воспринимать как жесткую рекомендацию, а как возможное решение. Ослабив оконечные спецификации расширения, можно увеличить его протяженность.

Предположим, уже определены допустимые показатели расширения и его длина. Следующим шагом при проектировании расширения является определение рабочих уровней усилителей. При допустимых ухудшениях 3 дБ для шума и 9 дБ для кроссмодуляции попытаемся улучшить значение C/N установлением более высоких входных уровней сигналов для усилителей расширения, чем для уже существующих транковых усилителей. Если при этом используются в расширении усилители с более высоким усилением, чем в существующей транковой структуре, то усилители расширения будут вносить более сильную кроссмодуляцию, чем транковые. Но это не будет помехой, так как в точке включения расширения имеется достаточный запас допустимого ухудшения интермодуляции (9 дБ). Более высокие передаточные позволяют повысить эффективность использования ответвителей вдоль структуры расширения или максимизировать длину расширения. Найдя промежуточный вариант, можно использовать оба эти преимущества. Высокие уровни позволяют применять более экономичный кабель меньшего диаметра для строительства расширения.

Определим теперь оптимальные показатели каскада усилителей расширения. Допустим, исходя из предполагаемой длины расширения было определено, что для его создания необходимо не менее 16 усилителей. Отношение C/N в точке начала расширения, как уже известно, равно 46 дБ. Если само расширение дает значение C/N , также равное 46 дБ, то в результате комбинирования получим отношение, которое точно совпадает с требуемым окончательной спецификацией значением 43 дБ. Это можно проверить с помощью диаграммы на для комбинирования отношений по мощности. Известное значение CXM в точке начала расширения равно 61 дБ. Если взять для расширения значение CXM , равное 56 дБ, то с помощью диаграммы для комбинирования отношений по напряжению, комбинируя значения 61 дБ и 56 дБ, получим значение 52 дБ, которое совпадает с требуемым окончательным значением. Допустим, что имеющиеся у нас усилители при входном рабочем уровне +8 дБ-мВ имеют отношение C/N , равное 57 дБ. Эти же усилители, используемые для передачи 21 каналов будут производить кроссмодуляцию, равную 83 дБ при выходном рабочем уровне +40 дБ-мВ. Тогда показатели расширения будут равны:

$$C/N_{\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N = 57 - 10 \lg 16 = 45 \text{ дБ,}$$

$$CXM_{\Sigma} = CXM_{yc} - 20 \lg N = 83 - 20 \lg 16 = 59 \text{ дБ.}$$

Если усилители в расширении будут работать при этих уровнях, то получится лучшее, чем допускается, значение вносимой кроссмодуляции, но не выполним требования по шуму. Однако, имея некоторую свободу в выборе рабочих уровней в расширении можно изменить их так, чтобы шум стал меньше, а кроссмодуляция увеличилась. Если увеличить входные и выходные уровни на 1,5 дБ, отношение C/N улучшится с 45 дБ до 46,5 дБ, а CXM ухудшится с 59 дБ до 56 дБ. Теперь результат комбинирования показателей расширения с показателями той основной части системы, получим полностью удовлетворительные значения для конечной точки.

16.11. Оценка необходимого количества усилителей

Приблизительная оценка необходимого количества усилителей на этапе проектирования системы важна для определения примерной стоимости строительства и, если потребуется, внесения корректировок в проект в тот момент,

Глава 16. Проектирование распределительной сети

когда это еще легко сделать. Корректировка может заключаться в выборе более дешевых усилителей или сокращении числа обслуживаемых абонентов. Например, если в первоначальном варианте проекта было решено, что большую часть домовых усилителей в распределительных сетях будут составлять арсенид-галлиевые усилители, но при этом разработчик в результате расчетов показателей нелинейных искажений в оконечных точках получил некоторый резерв по качеству, то часть этих усилителей можно будет заменить на более дешевые усилители PD. Если же разработчик не имеет резерва по качеству, но стоимость проекта все-таки оказалась завышенной, то протяженность некоторых кабельных ответвлений придется уменьшить или вовсе отказаться о них. То и другое позволит уменьшить удельную стоимость системы, т.е. стоимость системы на одного абонента и сохранить приемлемое качество обслуживания в оконечных точках.

Способ оценки необходимого количества домовых усилителей основывается на том, что предполагаемое число обслуживаемых абонентов заранее известно и известно, какое количество абонентов в среднем способен обслуживать один усилитель. Способ оценки необходимого количества магистральных усилителей основывается на приблизительном определении полных потерь по всей магистрали и исходя из того требования, что на каждом усилительном участке потери должны полностью компенсироваться усилением, т.е. величина полных потерь на усилительном кабельном участке L , равная разности выходного и входного уровней ΔS , должна быть равна коэффициенту усиления усилителя K_y :

$$L = \Delta S = K_y.$$

Под полными потерями понимается сумма потерь, вносимых на магистрали кабелем $\Delta S_{\text{каб}}$, и потерь, вносимых всеми пассивными распределительными устройствами (ответвителями, эквалайзерами) $\Delta S_{\text{пас}}$, на верхней частоте рабочего диапазона частот:

$$\Delta S_{\text{мар}} = \Delta S_{\text{каб}} + \Delta S_{\text{пас}}.$$

При известной планируемой протяженности магистрали, известной средней ответвительной нагрузке в области обслуживания, известных характеристиках потерь на ответвителях и других пассивных устройствах и известных нормированных потерях в выбранном кабеле, можно вычислить общие потери в магистрали. Тогда среднее количество магистральных усилителей будет равно:

$$n = \frac{\Delta S_{\text{мар}}}{K_y},$$

где $\Delta S_{\text{мар}}$ – полные потери в магистрали, K_y – коэффициент усиления усилителя.

Полученный при делении результат округляется до большего значения, поскольку в противном случае усиление на участке окажется несколько меньше потерь в нем, и потери не будут полностью компенсированы. Теперь можно определить примерное количество усилительных магистральных участков (оно будет на единицу меньше рассчитанного количества усилителей) и среднюю протяженность усилительного участка. Затем по этим результатам и известным значениям СТВ, CSO усилителей определяются максимальные рабочие выходные уровни домового и магистральных усилителей. Если в процессе проведения расчетов магистральных усилителей выясняется, что необходима корректировка выходных уровней усилителей, то ее проводят в сторону понижения.

16.11. Оценка необходимого количества усилителей

Поставим задачу по-другому. Для того, чтобы проверить, возможно ли построить магистраль желаемой протяженности, требуется определить, из какого количества однотипных магистральных усилителей можно составить каскад. Очевидно, этот расчет нужно выполнять с учетом величины создаваемых каскадом нелинейных искажений. Если показатели искажений при желаемой длине магистрали будут удовлетворительными, то вся планируемая область обслуживания будет охвачена системой. В противном случае придется либо уменьшить длину магистрали, либо выбрать усилители с лучшими показателями качества, либо выбрать кабель с меньшими потерями. Допустим, что общий СТВ магистрального каскада равен 84 дБ (при заданном $S_{вых}$), а установленное разработчиком нормативное значение этого показателя должно быть не ниже 57 дБ. Показатель СТВ всех остальных устройств магистрали равен 64 дБ. Вычислим допустимую величину искажений, приходящуюся на магистральные усилители:

$$СТВ_{mag} = -201g(10^{-84/20} + 10^{-64/20}) = 63,2 \text{ дБ.}$$

Полученное значение не ниже допустимого для всей магистрали значения 57 дБ. Отсюда легко найти допустимое число усилителей в каскаде по уже известной логарифмической формуле.

16.12. Оценка стоимости кабельной структуры

В заключение необходимо рассмотреть экономический аспект проектирования распределительной кабельной сети.

По рис. 16.4 можно видеть, что при построении структуры "транк-фидер" расход фидерного кабеля значительно больше, чем расход транкового кабеля. Это условие является типичным для городских систем. Поскольку фидерная структура имеет существенно меньшую стоимость строительства, чем транковая, то в целом система со структурой транк/фидер имеет значительное преимущество по стоимости перед распределительными системами других типов.

Возьмем произвольно значения стоимости строительства участков и рассчитаем примерную стоимость строительства этой системы. Допустим, стоимость строительства одного километра фидерной структуры равна 7000 долл., а стоимость строительства одного километра транка составляет 10 000 долл. Если в процессе проектирования удастся обеспечить соотношение четыре километра фидера на каждый километр транка, то система КТВ протяженностью 100 км будет характеризоваться следующими экономическими показателями:

20 км транка по 10 000 долл. за километр.....	200 000 долл.
80 км фидера по 7000 долл. за км.....	560 000 долл.
Общая стоимость сети (100 км).....	760 000 долл.
Средняя стоимость одного километра.....	7600 долл.

Экономические преимущества структуры транк-фидер неоспоримы, а методика проектирования системы по принципу транк-фидер является более совершенной. Но эффективность системы транк-фидер напрямую зависит от того, в каких конкретных условиях она применяется.

Далее оценим стоимость строительства кабельной структуры с учетом того, из чего она складывается, чтобы понять, как на ее основе делается выбор кабеля той или иной марки. Рассмотрим методику выбора кабеля на основе сравнения кабелей различных типов и размеров в соотношении с их стоимо-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

стью. Приводимые здесь значения технических параметров и стоимости следует рассматривать как приблизительные. Точные значения стоимости и параметров современных кабелей можно найти в прайс-листах и рекламных проспектах производителей кабельного оборудования. Динамичное изменение цен на кабели не позволяет привести точные цифры, поэтому цены даны в условных единицах, но разработчику достаточно понимания экономических аспектов. Считается, что соотношение цен на кабели различных типов остается примерно постоянным при изменении цен на всю линию изделий. На основе этого правила разработчик может провести сравнительную оценку стоимости кабельной структуры, аналогичную показанной здесь, и выбрать оптимальный вариант. Заметим, что не всегда стоимость кабеля является решающим фактором. Например, в крупных городских системах, построенных по принципу транк-фидер, выбор транкового кабеля большего размера может быть вполне оправдан только техническими соображениями независимо от его стоимости, что будет показано в последующих главах.

Анализ стоимости магистральной структуры легче выполнять в два этапа. Сначала проведем анализ стоимости магистральной структуры вместе с усилительным оборудованием, но отдельно от распределительной структуры, т.е. без учета ответвителей и делителей, служащих для подключения магистральных ответвлений. Средняя стоимость кабеля серии 540 составляет 1,5 долл. Стоимость кабеля может меняться в достаточно широких пределах, поэтому здесь в расчетах она выбрана произвольно. На втором этапе прибавляется стоимость распределительного оборудования. Допустим, произвольно, что магистральный кабельный маршрут имеет длину 10 километров, хотя для большинства проектов это значение сильно завышено. Будем считать, что усиление выбранного усилителя составляет 35 дБ. Предположим, что стоимость усилительного оборудования на каждом участке равна 900 долл., а годовая стоимость эксплуатации усилителя составляет 135 долл., хотя реальные цифры могут существенно отличаться от этих значений. В табл. 16.3 приведены потери для различных марок магистрального кабеля. Все рассматриваемые кабели имеют диэлектрик вспененного типа.

Таблица 16.3

Потери в магистральных кабелях

Тип кабеля	Потери, дБ/100 м		
	150 МГц	300 МГц	860 МГц
500	2,4	4,4	8,1
540	1,9	3,8	6,6
565	1,3	3,1	4,4

Зная тип кабеля, можно определить общие потери на магистральном маршруте длиной 20 километров и потери на один километр кабеля для максимальной частоты полосы передачи, а разделив общие потери на коэффициент усиления усилителя, определить необходимое общее количество усилителей и количество усилителей на километр. Затем, зная стоимости использованного кабеля и усилителей, получим общую и удельную стоимость километра кабельной структуры. На основе рассчитанной удельной стоимости будет логично

16.12. Оценка стоимости кабельной структуры

проводить сравнительный анализ экономической эффективности возможных вариантов структуры. Необходимо получить значения удельной стоимости для нескольких альтернативных вариантов, в которых используется разное число усилителей. В табл. 16.4 и 16.5 приведены результаты этих расчетов.

Таблица 16.4

Потери в магистральной структуре

Тип кабеля	Общие потери, дБ	Требуется усилителей	
		всего	на 1 км
500	810	23,1	2,3
540	660	18,8	1,8
565	540	15,4	1,5

Таблица 16.5

Стоимость магистральной структуры

Тип кабеля	Стоимость, долл.			
	кабеля	усилителей	общая	на 1 км
500	9000	21600	30600	3060
540	15000	17100	32100	3210
565	21000	14400	35400	3540

Проанализировав данные в таблицах, можно выбрать наиболее экономически эффективный вариант решения. Например, из табл. 16.5 видно, что удельная стоимость варианта, использующего кабель серии 540, составляет 3210 долл. на километр. В табл. 16.4 показано, что необходимое количество усилителей для этого варианта равно 19. Стоимость альтернативного варианта, использующего более дорогой кабель серии 565, которого составляет 3540 долл. на километр, что больше почти на 5000 долл. Однако, этот вариант требует только 15 усилителей, следовательно, годовая стоимость эксплуатации при взятом нами значении 135 долл. на усилитель снизится, по сравнению с предыдущим вариантом, на $135 \cdot 4 = 540$ долл. для каждого участка магистрального маршрута. Фактор уменьшения стоимости эксплуатации может быть определяющим при принятии решения.

Теперь проанализируем экономическую эффективность кабельной структуры с учетом потерь, вносимых магистральными ответвителями. В первом случае предполагается включение четырех ответвителей на километр, во втором – шести ответвителей, а в третьем – восьми ответвителей.

Суммируя стоимости кабеля и усилителей, получим комплексные оценки стоимости, которые представлены в табл. 16.6. При расчетах принималось среднее для магистральных ответвителей значение потерь. Стоимость структуры на 1 км рассчитывается, как и прежде, исходя из общей стоимости кабеля и усилителей, к которым теперь прибавляется стоимость ответвителей. Сравнивая данные этой таблицы, можно заметить, что, например, при использовании кабеля серии 540 прирост стоимости реализации на основе 8 ответвителей составляет примерно 5,8 %, а прирост стоимости реализации на основе 6 от-

Глава 16. Проектирование распределительной сети

ветвителей составляет примерно 2,9 % по сравнению со стоимостью реализации на основе 4 ответвителей. Аналогичное сравнение для 565-го кабеля показывает, что увеличение стоимости реализации на основе 6 ответвителей составляет 2,7 %, а увеличение стоимости реализации на основе 8 ответвителей составляет 5,4 % от стоимости реализации на основе 4 ответвителей. Обратите внимание на то, что для структуры с ответвлениями стоимость километра увеличивается с увеличением размера кабеля. Это означает, что потери вносимые ответвителями более значительны, чем потери в кабеле на каждом участке.

Таблица 16.6

Стоимость магистральной и распределительной структур

Тип кабеля	Количество ответвителей на 1 км		
	4	6	8
	Требуется усилителей всего		
500	26	27	28
540	21	22	23
565	17	18	19
Тип кабеля	Стоимость структуры на 1 км, долл.		
500	3260	3360	3460
540	3410	3510	3610
565	3650	3750	3850

Таким образом, увеличение размера кабеля с целью снижения требований к усилителю и, следовательно, уменьшения его стоимости не оказывает значительного влияния на реализацию распределительной структуры.

Таблица 16.7

Потери в распределительных кабелях

Тип кабеля	Потери, дБ/100 м		
	150 МГц	300 МГц	860 МГц
RG-59	10,9	12,9	24,0
RG-6	8,7	10,3	19,7
RG-11	5,8	6,9	12,9

Оценка стоимости прокладки распределительных ответвлений производится аналогичным образом, на основе известных длин ответвлений, потерь в них и известной стоимости метра кабеля. Средняя стоимость кабеля RG-6 может составлять около 0,25 долл., стоимость кабеля RG-11 может составлять около 0,5 долл., а стоимость кабеля RG-11 с несущим тросом – около 0,7 долл. В табл. 16.7 представлены приблизительные значения потерь на трех промежуточных частотах полосы передачи для кабелей магистральных ответвлений и абонентского кабеля RG-59.

Определим стоимость всех магистральных ответвлений на маршруте протяженностью 10 км для случая включения шести ответвителей на километр.

16.12. Оценка стоимости кабельной структуры

Поскольку кабель RG-6 для прокладки в грунте является наиболее дешевым, следовательно, начать анализ альтернативных вариантов следует с него. Цель анализа заключается в выборе наиболее экономичного кабеля, который будет удовлетворять всем требованиям к нагрузке на усилительном участке, при условии соблюдения требуемых уровней сигналов в окончаниях ответвлений. Под требованиями к нагрузке понимается снижение, насколько это возможно, выходных уровней ответвителей при данных потерях в кабеле. Таким образом, имея два противоречивых требования – минимизацию стоимости с одной стороны и минимизацию нагрузки с другой стороны – следует найти оптимальный вариант их сочетания, обеспечивающий ранее определенные уровни в сервисных точках. Допустим, что требуется обеспечить в окончании абонентского ответвления уровень +4 дБ·мВ. Примем длину кабеля ответвления равной 70 м. Потери в этом кабеле будут составлять 6,1 дБ на 150 МГц и 13,8 дБ на 860 МГц. Тогда для получения уровня +4 дБ·мВ в точке окончания ответвления потребуется на выходе ответвителя уровень +10,1 дБ·мВ на 150 МГц и +17,8 дБ·мВ на 860 МГц. При этих уровнях нагрузка на ответвители довольно высока, но затраты на строительство минимальны, поскольку использовался самый дешевый кабель. При включении 6 ответвителей на километр общее количество ответвлений на магистральном маршруте длиной 10 км будет равно 60. Стоимость одного ответвления будет составлять 17,5 долл., следовательно, стоимость всех ответвлений равна 1050 долл. При прокладке ответвления из кабеля RG-6 над землей надо учитывать дополнительную стоимость монтажных работ.

Таблица 16.8

Стоимость ответвлений

Тип кабеля	Способ прокладки			Стоимость структуры, долл.
	подвес без троса	с тросом	в грунте	
RG-6			×	1050
RG-6	×			1450
RG-11			×	2100
RG-11	×			2500
RG-11	×	×		2940

Если выбрать кабель RG-11 для прокладки в грунте, то потери при длине 70 м составят 4,1 дБ на 150 МГц и 9,0 дБ на 860 МГц. Тогда для подачи того же уровня +4 дБ·мВ в точку окончания ответвления потребуется +8,1 дБ·мВ на 150 МГц и +13,0 дБ·мВ на 860 МГц на выходе каждого ответвителя. Разница в стоимости одного ответвления между кабелями RG-6 и RG-11 при длине 70 м составит около 17,5 долл. Такое увеличение затрат на кабель RG-11 кажется вполне приемлемым, учитывая, что выходные спецификации всех ответвителей в системе становятся гораздо менее строгими по сравнению с вариантом использования кабеля RG-6. Продолжим сравнение для кабеля RG-11 с несущим тросом, предназначенным для подвесной прокладки над землей. Теперь потери в ответвлении будут теми же, т.е. нагрузка на ответвители не изменится. Разность в стоимости кабелей RG-11 с тросом составляет 14 долл. на одно ответвление

Глава 16. Проектирование распределительной сети

(49 – 35). Результаты оценки стоимости ответвительной структуры на магистральном маршруте длиной 10 км для варианта “6 ответвителей на километр” представлены в табл. 16.8.

Резюме

Приоритетным направлением в проектировании магистральных распределительных сетей, сегодня является использование иерархического принципа транк-фидер. Методика транк-фидер применяется почти повсеместно, но из этого не следует, что вариант проекта, выполненный по этой методике, всегда будет оптимальным с точки зрения стоимости. Особенности методики транк-фидер состоят в следующем:

- возможность обслуживать большую ответвительную нагрузку,
- значительное соотношение длины транка и фидера,
- значительная разница в стоимости строительства транковой и фидерной структур, как по кабелю, так и по усилителям.

В системе транк-фидер транковая подсистема специально спроектирована для работы с пониженными выходными уровнями сигналов, чтобы при больших искажениях, вносимых последующей фидерной подсистемой, оконечные показатели системы оставались в пределах нормы. Этот подход обеспечивает высокую эффективность использования ответвителей по всей фидерной структуре, но низкую экономичность транковой структуры, которая имеет довольно высокую стоимость. Фидерный каскад в общей сложности может включать не более трех усилителей.

Другим методом проектирования магистральных сетей является использование одного кабеля как для передачи сигнала на большое расстояние, так и для обслуживания конечных абонентов. Однокабельная методика неприменима в условиях сети большого масштаба с высокой плотностью нагрузки, но для районов с низкой и неравномерной плотностью нагрузки она позволяет сэкономить примерно 25 – 35 % затрат на строительство по сравнению с проектом транк-фидер. Однокабельная система представляет собой яркий пример системы с высокой плотностью устройств АРУ.

Техническую поддержку однокабельной сети можно значительно улучшить путем включения устройств авторегулировки в каждой точке расположения усилительного оборудования. Однако, в городских системах типа транк-фидер при существующем разнообразии оборудования и наличии нескольких определенно различных уровней передачи подобное упрощение технического обслуживания будет трудно выполнимо или менее эффективно. Высокая экономическая эффективность систем масштаба большого города позволяет обеспечить более сложную, адекватную ей процедуру технического обслуживания.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Построение сети КТВ большого масштаба, как правило, невозможно без создания еще одного иерархического уровня системы, называемого транспортным уровнем. Иерархическая уровневая модель большой системы КТВ, включающая все три уровня, была приведена во вводной главе. С помощью сети транспортного уровня сигналы с центральной головной станции передаются к магистральным распределительным сетям. Сейчас на транспортном уровне систем кабельного телевидения широко используется технология оптической передачи. Применение оптического волокна в сочетании с коаксиальным кабелем на распределительном уровне стало естественным и, вероятно, единственным возможным, продолжением развития широкополосных коаксиальных систем передачи в сторону увеличения их протяженности и полосы передачи. Обычными значениями канальной и абонентской емкости коаксиальной системы передачи возможности оптической системы далеко не исчерпывается.

В этой главе рассматриваются как аналоговые, так и цифровые технологии передачи в оптической линии. Сейчас почти повсеместно в сетях КТВ используются аналоговые технологии. Цифровые технологии пока следует рассматривать лишь как многообещающую перспективу, переход к ним станет по настоящему актуален только при полномасштабной интеграции сетей различного назначения.

17.1. Структура и функции транспортного уровня

Структура крупной системы КТВ уже была рассмотрена в первой главе. Напомним основные положения, касающиеся транспортного уровня. Можно выделить следующие элементы транспортной сети – центральная головная станция, транспортные линии, узловые (подголовные) станции. Центральная станция осуществляет передачу базового пакета услуг в транспортную сеть. Транспортная сеть образована несколькими транспортными линиями, которые предназначены для доставки сигналов к распределительным кабельным структурам. К выходу каждой транспортной линии подключается узловая станция. На узловой станции устанавливается приемник, являющийся одновременно источником сигнала для магистральной сети. Форма и уровень сигнала, передаваемого в транспортной линии, выбираются исходя из спецификаций приемника узловой станции. Различие между понятиями *распределение* и *доставка*, которые здесь используются, состоит в том, что *распределение* есть передача сигнала в сервисные или абонентские точки, находящиеся внутри данной области обслуживания, посредством структуры, состоящей из ответвителей, делителей и кабельных ответвлений. *Доставка* есть передача сигналов из одной точки в другую по линии, не имеющей ответвлений и собственной распределительной структуры. Таким образом, доставка сигнала не предполагает обслуживания ни

Глава 17. Проектирование транспортной сети

сервисных точек, ни, тем более, конечных абонентов на протяжении маршрута линии передачи. Транспортную линию передачи иногда называют супертранком, подразумевая под этим магистраль (транк) более высокого уровня. Транспортная сеть может иметь доступ в крупные национальные сети передачи данных, являясь их логическим продолжением.

Функции транспортного уровня подобны функциям магистрального уровня, который тоже предназначен в основном для доставки сигналов, но имеются серьезные различия. Первое различие состоит в том, что в магистральную линию могут подключаться как группы абонентов (домовые сети), так и отдельные абоненты (как это было показано на примере однокабельного маршрута) с помощью магистральных ответвлений. Следовательно, магистральная линия частично выполняет и функции распределения сигнала. Транспортная линия, напротив, не имеет никакой распределительной структуры и предназначена только передачи сигналов между двумя точками. В транспортную линию могут подключаться только магистральные линии передачи и только в ее конечной точке, т.е. на узловой станции. Второе различие состоит в том, что качество передачи в транспортной линии должно быть еще более высоким, чем в магистральной.

Транспортная сеть охватывает всю обслуживаемую область. Поскольку сигналы, передаваемые на узловую станцию, затем поступают в местную распределительную сеть, где они будут накапливать все шумы и искажения, которые вносит данная сеть, то шумы и искажения, вносимые самим супертранком, следует существенно ограничить. В этих условиях проект супертранка должен быть весьма консервативным. Именно поэтому в настоящее время практически полностью отказались от использования в транспортных линиях коаксиального кабеля и перешли на волоконно-оптический кабель, имеющий наилучшие из возможных показатели качества. Как альтернативный вариант транспортной линии, который также рассмотрен далее, может использоваться радиорелейное звено, но как основной вариант будем рассматривать оптическую линию. Строгие требования, обуславливающие высокое качество передачи в супертранке, делают создание транспортной структуры довольно дорогостоящим. Для передачи сигнала на транспортном уровне с повышенным качеством используются цифровые технологии, которые будут рассмотрены далее.

Таким образом, сеть транспортных линий служит для объединения всех распределительных магистральных сетей в рамках обслуживаемой области системы КТВ. Транспортная сеть строится по одному из двух вариантов топологии – “звезда” или “кольцо”. В звездообразной топологии транспортные линии радиально расходятся от центральной головной станции (ЦГС), и в конце каждой линии находится узловая станция (УС), как показано на рис. 17.1. В кольцевой топологии узловые головные станции, соединенные транспортными линиями, образуют вместе с центральной головной станцией замкнутое кольцо. Топология “дерево” является здесь не самостоятельной топологией, а лишь частным случаем топологии “звезда”, в которой головные станции, соединенные транспортными линиями, образуют не несколько расходящихся маршрутов, а один маршрут любой необходимой конфигурации, подходящей для данной области обслуживания, например, незамкнутое кольцо или прямую линию. Такая структура транспортной сети показана на рис. 17.2,а. Расход кабеля и принцип логического подключения в дереве будет тем же, что и в звездообразной топологии. Выбор того или иного варианта определяется, в основном,

17.1. Структура и функции транспортного уровня

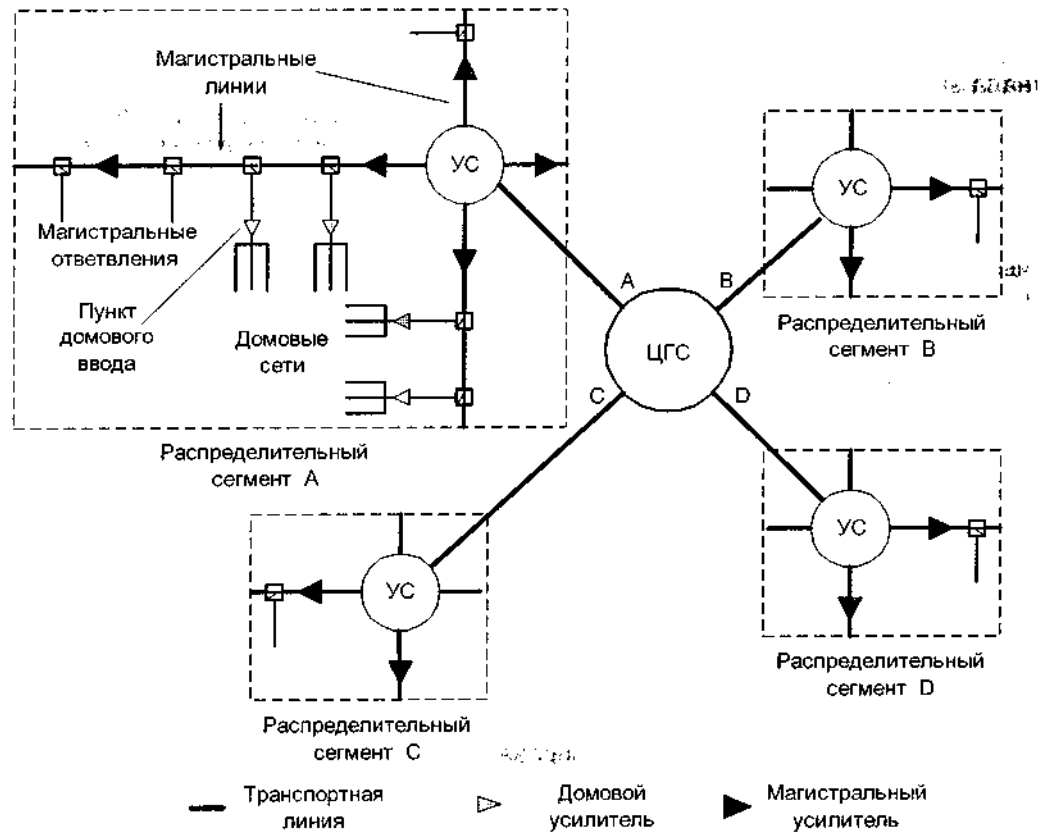


Рис. 17.1. Система КТВ

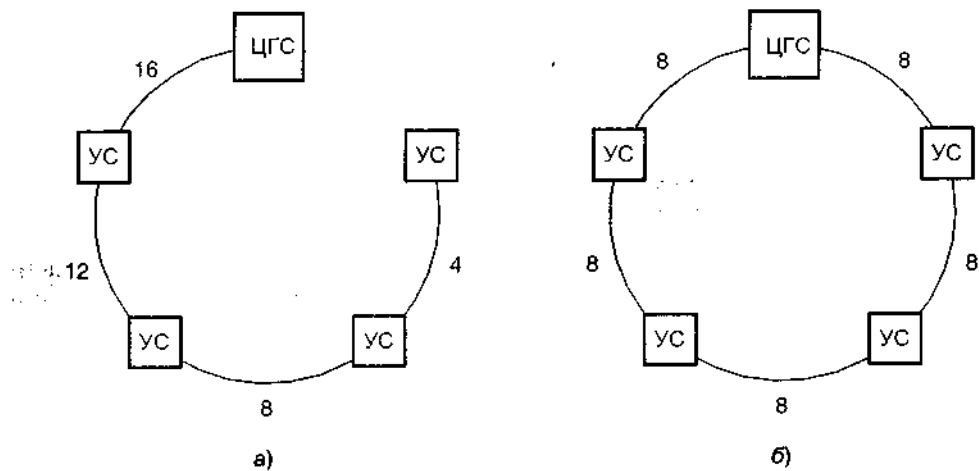


Рис. 17.2. Транспортная сеть:
а – топология "дерево"; б – топология "кольцо"

Глава 17. Проектирование транспортной сети

только требованием к надежности системы. Чаще всего транспортная сеть строится по принципу кольца, так как это повышает надежность доставки сигнала за счет дополнительной линии передачи. Кольцевая структура позволяет реализовать схему полного резервирования, т.е. резервировать не только оборудование, но и маршруты прокладки кабеля. Кольцевая структура транспортной сети показана на рис. 17.2,б.

Самым простым решением задачи резервирования кабельных направлений передачи является прокладка кабеля между узловой станцией и магистральными оптическими приемниками двумя параллельными независимыми маршрутами. При этом подразумевается установка типовых оптических разъемов на основном и на резервном маршруте, что позволяет в случае неисправности кабеля осуществить ручное переключение оптического приемника с одного маршрута на другой. Однако, в системе с резервированием необходимо обеспечить не только высокую надежность, но и минимальное время восстановления работоспособности сети, что особенно важно при предоставлении интерактивных услуг, когда крайне нежелательно прекращение связи на неопределенный промежуток времени. Поэтому в этом случае необходимо использовать систему резервирования с автоматическим переключением пути передачи самим приемником. Схема переключения срабатывает по условию пропадания контрольной несущей. Резервирование по оборудованию оптических узлов реализуется с помощью сдвоенных оптических приемников и передатчиков, когда в одном корпусе установлен двойной комплект оптического оборудования. Следует обратить внимание на то, что резервирование узлов может выполняться отдельно по прямому и обратному каналам. Полным резервированием называется сочетание резервирования по направлениям и по узлам. Это самая надежная схема, в которой в случае выхода из строя одного оптического из приемников, осуществляется автоматическое переключение на второй приемник, а в случае повреждения одного из двух оптических кабельных маршрутов осуществляется автоматическое переключение на второй маршрут. Схема оборудования оптического узла, обеспечивающего полное резервирование, показана на рис.17.3. Какую схему резервирования реализовывать, определяет сам оператор сети в зависимости от решаемых им задач.

Создание транспортной сети подразумевает сегментирование обслуживаемой области, т.е. выделение в ней нескольких распределительных сегментов, каждый из которых обслуживается своей узловой станцией. Эта идея присутствует в любом варианте топологии. Узловые станции играют очень важную роль в больших кабельных системах, поскольку именно они реализуют принцип сегментации. Например, система КТВ большого масштаба, обслуживающая город с населением более миллиона человек и несколькими районами, может включать одну центральную станцию, установленную вблизи географического центра города, и 4 – 5 узловых станций, каждая из которых обслуживает, например, один район города. Допустим, что потенциальное число абонентов в городе составит 100 тысяч человек, тогда на каждый район придется в среднем по 20 тысяч абонентов. К центральной станции в любой топологии может подключаться не только транспортная линия, но и непосредственно распределительный сегмент (обычно в кольцевой топологии). При этом в разных вариантах топологии расход кабеля и, следовательно, стоимость строительства, будет различаться. В звездообразной или древовидной топологии количество транспортных линий будет соответствовать количеству узловых станций (районов

17.1. Структура и функции транспортного уровня

города), в а кольцевой топологии оно будет на единицу больше. Покажем это на примере нашего воображаемого города. Допустим, что в обслуживаемой области города установлено 5 головных станций, включая центральную, и предположим, что все станции расположены на одинаковых расстояниях друг от друга (10 км). Далее, предположим, что для обеспечения необходимой пропускной способности в каждой транспортной линии необходимо проложить четыре оптических волокна. Следовательно, при одном и том же способе географического расположения станций в случае кольцевой топологии общая протяженность транспортной сети в городе составит 50 км, а в случае древовидной она составит только 40 км. Однако, количество волокон в обоих случаях с учетом резервирования будет одинаковым. Так, в первом случае оно будет равно $4+8+12+16 = 40$, а во втором $8*5 = 40$. Резервирование в кольце достигается за счет создания двух противоположных направлений передачи (рис. 17.2).

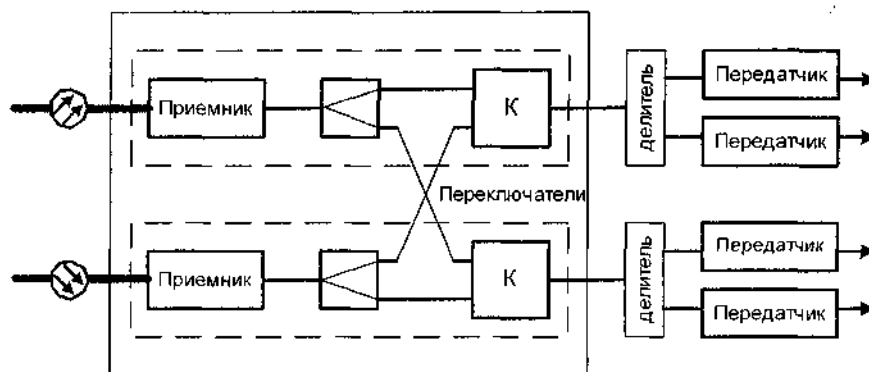


Рис. 17.3. Оптический узел с полным резервированием

Разумеется, это упрощенная схема, а в реальных условиях иногда бывает трудно выбрать оптимальное расположение центральной станции, маршруты прокладки транспортных линий и их необходимое количество, так как география местности и конфигурация области обслуживания могут быть достаточно сложными. Помимо прочих достоинств, связанных с повышением качества передачи, сегментирование дает ощутимые преимущества при предоставлении абонентам служб передачи данных в интерактивном режиме. Сегментирование области обслуживания дает возможность по усмотрению оператора КТВ формировать на узловых станциях разные пакеты каналов и услуг, которые будут использоваться только в данном районе, добавляя или убирая что-то из базового пакета, который передается с центральной станции. Сегментирование также улучшает управляемость сети, поскольку система менеджмента становится распределенной, а не возлагается на одну центральную станцию. Снижается нагрузка на обслуживающий персонал, который будет должен поддерживать не все количество абонентов городской сети, а только ту их часть, которая обслуживается данным сегментом.

С точки зрения разработчика сегментирование упрощает проектирование крупномасштабной системы КТВ. Допустим, центральная головная станция соединена с четырьмя распределительными сегментами (А, В, С и D) с помощью четырех транспортных линий, как показано на рис. 17.1. Сегмент включает уз-

Глава 17. Проектирование транспортной сети

ловую станцию и обслуживаемую им распределительную сеть со всеми магистралями и домовыми сетями. На каждой узловой станции начинается отдельная широкополосная распределительная сеть с коаксиальными (реже оптическими) магистралями, которая может быть организована по принципу транкфидер или на основе одного кабельного маршрута. Все транспортные линии и распределительные структуры могут быть двунаправленными. Хотя во всех четырех линиях, могут передаваться одни и те же сигналы, проще рассматривать каждую линию как отдельный элемент системы. При таком подходе каждый сегмент проектируется как отдельный модуль, а затем система в целом строится путем комбинирования этих модулей. Вычисляя, например, показатели передачи в окончании сегмента А, можно учесть именно тот шум и те интермодуляционные искажения, которые вносят его магистральные линии, узловая станция и транспортная линия А. Разумеется, комбинирование модулей выполняется с учетом допустимых показателей качества для системы в целом.

17.2. Волоконно-оптическая транспортная линия

Необходимость использования ВОСП на транспортных линиях обусловлена многими причинами. Ранее, когда для создания транспортной сети использовался коаксиальный кабель самого лучшего качества, разработчику приходилось прибегать ко множеству ухищрений, чтобы добиться приемлемых показателей шума и интермодуляции в системе. В частности, для уменьшения искажений и затухания сигналов ограничивалась верхняя частота полосы передачи. Использовались поддиапазоны с частотами передачи между 5 и 88 МГц, где размещались только 13 телевизионных каналов, или в полосе от 5 до 108 МГц, в которой можно было передать только 17 каналов (без учета факторов частотного планирования). Этот способ явно не имел перспективы, поскольку сильно ограничивал число передаваемых каналов. Другим способом было использование частотной модуляции (ЧМ) для передачи сигналов в супертранке. Несущие модулируются по частоте для получения выигрыша в отношении сигнала к шуму. Использование ЧМ в действительности не улучшает отношение С/Н системы, но снижает чувствительность сигнала к влиянию шума. Этот подход требовал сначала демодуляции аудио и видео составляющих амплитудно-модулированного сигнала с остаточной боковой полосой, а затем частотной модуляции для передачи и обратного преобразования в АМ на каждой узловой станции. Иначе потребовалось бы обрабатывать сигнал в каждой абонентской точке, чтобы обеспечить прозрачный интерфейс кабельной сети с телевизионным приемником абонента, который работает с входными АМ сигналами. Использование ЧМ в передающих системах, кроме того, требовало большей полосы частот, поскольку один телевизионный АМ-сигнал занимает 6 МГц, а один ЧМ-сигнал занимает около 14 МГц. Количество ТВ сигналов приходилось увеличивать путем резервирования передающего оборудования на узловых станциях и прокладки дополнительных параллельных кабелей. Тем не менее, этот способ применялся в кабельных сетях, когда транспортные линии создавались на основе коаксиального кабеля, и применяется сейчас на оптических транспортных линиях в некоторых случаях, о которых будет сказано ниже. Описанные приемы требовали больших затрат, а после расширения полосы частот до 900 МГц и вовсе стали неприменимы. С развитием цифровых технологий уплотнения сигналов и появлением оптических систем передачи проблема стала решена.

Использование ВОЛС в качестве транспортной линии значительно расширяет возможности всей кабельной системы передачи. Устраняются многие проблемы, присущие радиорелейной или коаксиальной линии передачи. Оптическая система передачи практически не создает искажений и шума в передаваемом сигнале, поэтому при дальнейшем объединении ее с коаксиальной распределительной сетью проблем не возникает. Оптическая линия передачи соединяет центральную головную станцию с узловой станцией, на которой устанавливается оптический приемник, или узловые станции между собой (в кольце). Если распределительная сеть остается коаксиальной, возникает необходимость в преобразовании сигнала из оптической формы в электрическую на выходе оптического приемника. При комбинировании оптической транспортной сети с коаксиальной распределительной сетью получаем систему КТВ с архитектурой, известной под названием гибридной коаксиально-оптической системы (Hibrid Fiber Coaxial, HFC). Эта архитектура признана наиболее эффективной и экономичной на сегодня для построения больших систем КТВ. Создание волоконно-оптических транспортных и магистральных линий позволяет решить следующие важные проблемы:

- существенно повышается отношение сигнала к шуму;
- увеличивается допустимая протяженность линии при данной полосе частот, что очень существенно при расширении области обслуживания;
- увеличивается пропускная способность линии, что очень важно при увеличении количества абонентов и количества предоставляемых сетью телевизионных каналов и других услуг;
- устраняется влияние внешних электромагнитных помех;
- удовлетворяются требования к конфиденциальности передаваемой информации и защите системы от несанкционированного доступа.

Передача сигнала в транспортной сети осуществляется по одномодовому оптическому волокну на длине волны 1310 нм или (и) 1550 нм. Длина волны 850 нм здесь не используется из-за большого затухания и сильной дисперсии.

Передача сигналов в оптических транспортных и магистральных линиях может осуществляться в аналоговом или цифровом виде. Первоначально на транспортных оптических линиях использовалась аналоговая передача. При этом сигналы передавались в частотной модуляции и с частотным мультиплексированием. На рис. 17.4 показана система с аналоговой оптической линией передачи. Слева показана передающая часть оборудования линии, установленная, например, на ЦГС, а справа находится приемная часть, установленная на ПС (оптическом узле). Сигналы, подаваемые в коаксиальную распределительную структуру, должны быть повторно демодулированы в АМ на приемной узловой станции, которая служит распределительным узлом коаксиального сегмента. В этой схеме модуляция в оптической линии может быть и амплитудной, тогда повторная модуляция на оптическом узле не потребуется. Это несколько ухудшит качество передачи, но существенно снизит стоимость системы.

Аналоговая передача в оптической транспортной сети успешно применяется при построении средних систем КТВ. При построении больших систем КТВ возможности аналоговой оптической передачи ограничены ввиду ограничения произведения "расстояние-полоса". Предельное расстояние, на которое можно передать сигнал при фиксированной полосе пропускания волокна, определяется стандартной дальностью передачи по оптическому волокну, действующей как для аналоговой передачи, так и для цифровой.

Глава 17. Проектирование транспортной сети

Напомним, что максимальная дальность передачи на длине волны 1310 нм для одномодового волокна составляет около 30 км. Для длины 1550 нм предельная дальность передачи составляет приблизительно 90 км. При большей длине линии придется установить регенератор. С помощью используемых в аналоговой передаче методов модуляции невозможно передать большее количество каналов, чем по коаксиальному кабелю. Если создается интерактивная сеть, то с учетом нагрузки на обратный канал это количество будет еще меньше. Кроме того, качество передачи, хотя и выше, чем в коаксиальном кабеле, может быть недостаточно высоким, если оптическая система включает несколько регенерационных участков.

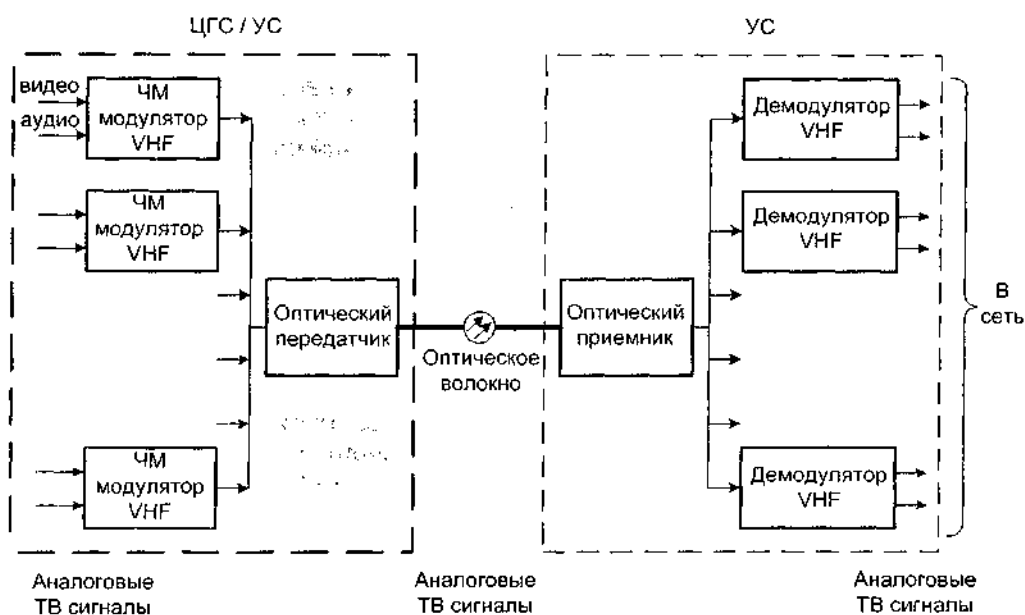


Рис. 17.4. Аналоговая оптическая линия передачи

При создании крупных сетей кабельного телевидения неизбежным решением является переход к цифровой транспортной сети. Поэтому в настоящее время все более часто оптическая технология используется в сочетании с цифровыми методами передачи. Если в транспортной сети передаются сигналы в цифровом виде, то на стыке оптической и широкополосной коаксиальной сети, т.е. на узловой станции, должно выполняться преобразование цифрового сигнала в аналоговый.

При этом возможны два варианта преобразования. В первом варианте на узловой станции цифровые потоки преобразуются в сигнал формата DVB-C с модуляцией QAM. Вторым вариантом является перевод цифровых сигналов прямо в традиционные AM сигналы, воспринимаемые всеми телевизионными приемниками. Для преобразования сигнала используются специальные каналные процессоры, в состав которых входит декодер MPEG-2 и модулятор AM или модулятор QAM. Во втором случае можно также использовать обычные ТВ модуляторы, если нет необходимости в передаче телевизионных каналов со стереозвучанием.

17.2. Волоконно-оптическая транспортная линия

Структурная схема системы передачи с преобразованием цифрового сигнала в аналоговый изображена на рис. 17.5. Для упрощения рисунка показано только приемное окончание линии.

В любом из рассмотренных вариантов структуры и технологии передачи в оптической транспортной сети качество передачи в ней будет гораздо лучше, чем в обычной коаксиальной системе. Однако, даже использование в транспортной сети оптической технологии передачи не отменяет необходимости достаточно консервативного проектирования нижележащего магистрального уровня системы, выполненного на коаксиальном кабеле.

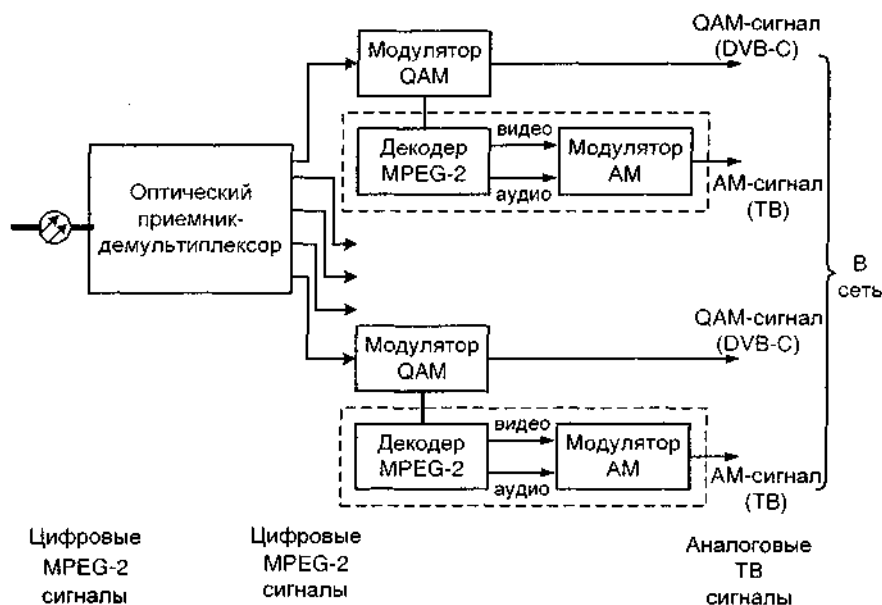


Рис. 17.5. Цифровая оптическая линия передачи

Неправильный подход к проектированию магистральной сети может снизить даже самые высокие показатели качества передачи в транспортной сети. Поэтому магистраль должна быть настолько прозрачной для сигнала по шуму и искажениям, насколько это возможно, чтобы после вносимых последующими распределительными структурами шумов и искажений результирующее качество передачи оставалось приемлемым. Если это по каким-либо причинам оказывается невозможным, то решением может быть создание магистрального уровня ("последней мили") также на основе оптического кабеля.

17.3. Цифровые технологии передачи

Только цифровые технологии передачи дают возможность реализовать все преимущества, предоставляемые оптическим волокном в плане повышения емкости и качества передачи. Переход к цифровым технологиям неизбежен при построении сетей кабельного телевидения большого масштаба. Можно сказать, что волоконно-оптические системы передачи ориентированы, прежде всего, на цифровую передачу. Сейчас цифровые технологии все быстрее и

Глава 17. Проектирование транспортной сети

увереннее внедряются в системы кабельного телевидения и, вероятно, скоро станут стандартом и для них. О достоинствах цифровых сетей в сравнении с аналоговыми уже было сказано достаточно много. Резюмируем главные из них.

Появляется возможность создавать системы передачи любой протяженности, поскольку в цифровой сети отсутствует накопление искажений и шума, а, следовательно, количество цифровых узлов приема-передачи, включаемых в каскад, не ограничено. Объясняется это тем, что на каждом цифровом узле (при наличии соответствующего активного оборудования) сигнал восстанавливается без потерь качества, т.е. в том же виде, в каком он был передан с центральной головной станции. Разумеется, сигнал искажается даже при передаче по высококачественной волоконно-оптической линии и при обработке в цифровом оборудовании, что в цифровой технике выражается в количестве бит, переданных с ошибками (BER). Но, во-первых, для одномодового волокна значение BER очень мало (порядка 10^{-5}), т.е., на несколько сотен тысяч переданных бит в среднем лишь один является ошибочным, а, во-вторых, для повышения качества используются помехоустойчивые коды, способные исправлять возникающие при передаче ошибки. Методы обработки сигналов в цифровом оборудовании также радикально отличаются от методов восстановления сигналов в активном аналоговом оборудовании. В результате вероятность ошибки на бит снижается до величины порядка 10^{-9} и даже менее, что позволяет говорить о такой передаче как о неискажающей. Объективное техническое ограничение протяженности системы существует только на длину отдельной волоконной линии передачи, проложенной между двумя цифровыми узлами. В главе, посвященной волоконно-оптическому кабелю, говорилось, что длина отрезка волокна, полоса пропускания и дисперсия связаны таким образом, что при увеличении длины и полосы дисперсия растет и качество передачи в волокне падает, причем, на меньших значениях длин волн эта зависимость выражена сильнее. Однако и это ограничение уже можно обойти. Самым очевидным и дорогостоящим решением является увеличение цифровых станций. Другим вариантом является применение волокна с очень низкой дисперсией, которое выпускается в настоящее время. Новым, революционным, шагом в этом направлении является использование солитонной технологии, смысл которой в специальной форме передаваемых оптических импульсов. Этот метод позволяет передавать сигнал на *тысячи километров* без регенерации.

Второе главное достоинство состоит в возможности создания сетей, предоставляющих множество различных услуг. Такие сети называются сетями с интеграцией служб. В них абонент получает не только возможность просмотра телевизионных каналов, но и доступ к службам, предоставляемым внешними национальными и транснациональными сетями, например, сетью Интернет, телефонной цифровой сетью, различными сетями передачи данных. Для этого, разумеется, наша сеть КТВ должна иметь шлюзы доступа к каждой из этих внешних сетей. Шлюзы реализуются с помощью специального коммуникационного оборудования, обсуждение которого является темой отдельной книги. Преимущество цифровых технологий в этом случае заключается в гибкости интеграции этих служб в одной сети. Не вдаваясь в теоретические детали цифровой передачи можно сказать следующее. Цифровые потоки служб, передаваемые по этим сетям, очень разнородны (по таким параметрам как пачечность трафика, пиковая и средняя скорости передачи, требования к времени задержке и джиттеру задержки) и эффективное использование полосы пропускания

системы при их совместной передаче в одной сети возможно только с применением цифровых технологий (в частности, технологии ATM). Как дополнительное преимущество при этом получаем увеличение объема передаваемой информации. Поскольку стоимость цифрового оборудования довольно высока, экономически целесообразно создавать такие сети в крупных городах и индустриальных районах.

Некоторые тенденции в телекоммуникационной отрасли способствуют быстрейшему переходу на цифровые технологии передачи в кабельных сетях. Об одном уже было сказано – это разнообразие услуг, которые может предоставить сеть. Если оператор хочет сделать свою сеть конкурентоспособной, он будет вынужден постепенно увеличивать количество услуг, добавляя к ТВ вещанию телефонную связь, передачу данных, видео по запросу и другие мультимедийные сервисы, а это можно сделать только в цифровой сети. Другим стимулирующим фактором является переход спутникового вещания на цифровой формат. Спутниковые станции, как известно, являются основными источниками сигналов для кабельной сети, а подавляющее большинство спутниковых каналов сейчас транслируется в цифровом формате DVB-S с модуляцией QPSK. Принимая цифровой спутниковый сигнал, оператор может не преобразовывать его в аналоговую форму, а передавать в сеть в модуляции QPSK, стандарт EN-50083 это допускает. В таком случае на головной станции не потребуется устанавливать трансмодулятор для каждого канала. В остальных случаях, когда сигнал передается в сеть в формате DVB-C с модуляцией QAM или в формате PAL/SECAM в модуляции AM, будет необходим дополнительный канальный блок – в первом случае трансмодулятор QPSK/QAM, а во втором случае обычный ТВ модулятор. При передаче в сети сигнала QPSK у каждого абонента, конечно, потребуется установить декодер. В качестве еще одного фактора, обуславливающего необходимость создания цифровых транспортных сетей, можно назвать укрупнение и объединение отдельных местных сетей КТВ малого масштаба в единую телекоммуникационную структуру. Важно при этом использовать так называемые открытые (общепринятые) стандарты, такие как SDH и ATM, поскольку это позволяет создавать не только обособленные сети масштаба города или региона, но и сети, интегрированные в общегосударственные и мировые телекоммуникации.

Наиболее распространенными методами скоростной передачи цифровой информации на транспортном уровне, использующими оптическое волокно как среду передачи, являются две технологии уплотнения каналов – технология цифрового временного мультиплексирования TDM и технология волнового мультиплексирования WDM. Схема временного мультиплексирования TDM реализуется на основе PDH (plesiochronous цифровой иерархии, ПЦИ) или SDH/SONET (синхронной цифровой иерархии). Иерархия SDH является более современной и используется в большинстве строящихся сейчас сетей. Различия между этими иерархиями будет понятно далее. Технология WDM на российских сетях пока не применяется в силу своей дороговизны и неполностью исчерпанных возможностей технологии TDM.

PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)

Технология PDH появилась в начале 1980-х годов и первоначально использовалась для передачи по коаксиальному медному кабелю. Позднее, с ростом скоростей передачи, она стала применяться и в волоконно-оптических сетях.

Цифровая иерархия PDH включает несколько уровней мультиплексирования цифровых потоков и на каждом следующем, более высоком уровне, скорость общего цифрового потока увеличивается в четное число раз. На нижнем уровне цифровой иерархии находится так называемый основной цифровой канал (ОЦК) со скоростью передачи 64 Кбит/с (от также называется DS0). Мультиплексор первого уровня формирует первичный цифровой канал (ПЦК) со скоростью $n \cdot 64$ кбит/с (DS1), мультиплексор второго уровня формирует вторичный цифровой канал (ВЦК, DS2) со скоростью $m \cdot DS1$, мультиплексор третьего уровня формирует третичный цифровой канал (ТЦК, DS3) со скоростью $k \cdot DS2$ и так далее. Используя мультиплексоры с различными коэффициентами мультиплексирования ($n:1$, $m:1$, $k:1$ и так далее), можно сформировать различные иерархические наборы скоростей передачи и довести процесс мультиплексирования до необходимого уровня, дающего требуемое число каналов DS0 в выходном цифровом потоке. К информационным каналам добавляются еще один или два канала DS0 для целей синхронизации, сигнализации и контроля ошибок. Потоки, формируемые на каждом уровне, имеют четкую циклическую структуру и называются фреймами. Такая схема каскадного мультиплексирования показана на рис. 17.6.

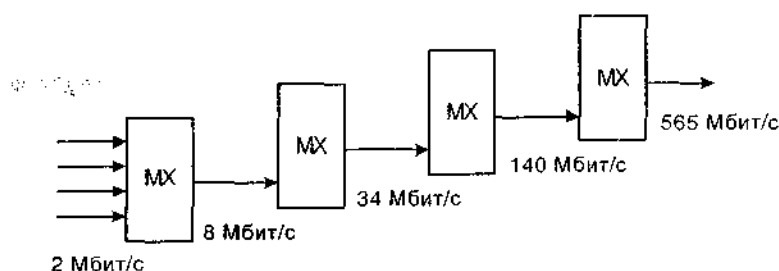


Рис. 17.6. Мультиплексирование на основе PDH (E)

Эта схема мультиплексирования имела несколько серьезных недостатков. Прежде всего, это касалось несовместимости оборудования. В мире было разработано три плезиохронных иерархии – североамериканская (США, Канада), японская (Япония) и европейская (Европа и Южная Америка) – каждая со своим иерархическим набором скоростей передачи. Так, в первой и второй иерархии в качестве скорости канала первого уровня мультиплексирования DS1, который назывался здесь T1, была принята скорость 24 каналов DS0, т.е. 1544 Кбит/с. В третьей иерархии скорость канала DS1, который назывался здесь E1 составляла 2048 Кбит/с, т.е. коэффициент первичного мультиплексирования был равен 30. На более высоких уровнях также наблюдалось различие коэффициентов мультиплексирования. Постоянный коэффициент, равный 4, использовался только в европейской иерархии. Это привело к нестыковке форматов фреймов трех иерархий. Скорости передачи фреймов в каналах всех трех иерархий приведены в табл. 17.1.

Другим недостатком была довольно сложная аппаратная реализация. Например, в европейской иерархии для получения скорости 140 Мбит/с (139264 Кбит/с) схема должна включать три уровня мультиплексоров на передающей стороне и столько же демультиплексоров на приемной стороне.

Иерархии PDH

Канал	Скорость передачи в иерархиях, Кбит/с		
	Американская (Т)	Японская (J)	Европейская (Е)
DS0	64	64	64
DS1	1544	1544	2048
DS2	6312	6312	8448
DS3	44736	32064	34368
DS4	274176	97728	139264
DS5	–	397200	564992

Несмотря на это в восьмидесятые годы системы PDH были широко распространены и использовались, в основном, для передачи цифровых телефонных каналов в транковой линии. Тогда для этого использовался дорогой коаксиальный кабель высокого качества. Еще одним недостатком PDH было отсутствие четких механизмов управления и маршрутизации мультиплексированных потоков, что крайне важно для применения в сетях передачи данных.

SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

Параллельное развитие трех различных иерархий мешало развитию глобальных телекоммуникаций. Кроме того, постоянно росли потребности в больших скоростях передачи, приближавшихся к 1 Гбит/с. Возможности PDH на таких скоростях достигли своего предела, поскольку наибольшая возможная скорость, достигавшаяся в европейской иерархии, составляла 565 Мбит/с. Поэтому в 1989 г. комитетом по стандартизации ITU-T (ССИТТ) был разработан новый стандарт в виде рекомендаций G.707, G.708 и G.709. В этом стандарте, названном синхронной цифровой иерархией SDH (СЦИ), был введен единый ряд скоростей передачи, что позволило использовать стандартные интерфейсы для стыковки оборудования разных производителей. Американская реализация этого стандарта, на этот раз совместимая с европейской, была названа SONET/SDH. Стандарт SDH был разработан на основе двух предыдущих иерархий PDH – американской и европейской, чтобы обеспечить преемственность и хотя бы частичную поддержку скоростей PDH. Для этого мультиплексоры SDH были рассчитаны на работу со стандартными скоростями, принадлежащими следующему объединенному ряду обеих иерархий: 1,5 Мбит/с; 2 Мбит/с; 6 Мбит/с; 34 Мбит/с; 45 Мбит/с; 140 Мбит/с. Иначе говоря, иерархия SDH поддерживает скорости каналов T1, E1, T2, E3, T3 и E4. Цифровые потоки сигналов, скорость передачи которых соответствует этому ряду, еще называют трибами PDH.

В основе стандарта SDH лежит идея транспортировки указанных потоков PDH путем их упаковки (инкапсуляции) в стандартные виртуальные контейнеры VC (Virtual Container). Каждый контейнер имеет четкую структуру, в которой есть заголовок, содержащий сведения для управления и маршрутизации контейнера, и область для размещения полезных данных – таких же контейнеров

Глава 17. Проектирование транспортной сети

нижних уровней меньшего размера. Т.е. контейнеры низших уровней инкапсулируются в качестве полезной нагрузки в контейнер высших уровней по принципу последовательных вложений. Существуют контейнеры 4 уровней: VC-1, VC-2, VC-3, VC-4. Это деление соответствует четырем используемым уровням PDH (1-й уровень – T1/E1; 2-й уровень – T2; 3-й уровень – E3/T3; 4-й уровень – E4). Контейнер максимального размера VC-4 формируется при инкапсуляции потока четвертого уровня со скоростью 140 Мбит/с. Применение технологии вложенных виртуальных контейнеров для упаковки фреймов PDH в единый контейнер позволяет легко выделять фреймы данных PDH без необходимости проводить разборку и повторную сборку контейнера. Выделение определенного фрейма (например, потока E3) из контейнера становится возможным благодаря тому, что положение каждого фрейма входного потока в общем потоке известно и определено указателем на начало этого фрейма в структуре контейнера. Сохранение указателей в заголовке контейнера позволяет гибко формировать внутреннюю структуру полезной нагрузки контейнера и организовать эффективную контролируемую систему передачи данных по сети.

Собранные таким образом контейнеры затем упаковываются в так называемые синхронные транспортные модули STM-1 (Synchronous Transport Module), которые уже непосредственно передаются по цифровому каналу. Упаковка производится по тому же принципу – к полю полезной нагрузки, содержащему виртуальные контейнеры, добавляется заголовок с управляющей информацией. Аналогично PDH эти модули мультиплексируются по n-уровневой схеме, но здесь используется единый для всех уровней коэффициент мультиплексирования, равный 4. Следовательно, стандартный ряд каналов иерархии SDH включает каналы, по которым передаются модули STM-1, STM-4, STM-16 и так далее. Скорость основного цифрового канала SDH (скорость передачи модуля STM-1) вычисляется исходя из того, что размер в поле полезной нагрузки модуля STM-1 должен помещаться виртуальный контейнер максимального размера VC-4, соответствующий скорости передачи 140 Мбит/с. С учетом заголовка и полезной нагрузки размер STM-1 должен составлять 19440 бит. При частоте 8 КГц, с которой АЦП формирует битовые последовательности на передающей стороне, скорость основного цифрового канала SDH оказывается равной 155520000 бит/с, т.е. около 155 Мбит/с. В таком канале можно передать один триб E4 или три триба E3/T3, соответствующих скоростям 34/45 Мбит/с. Исходя из этого, нетрудно подсчитать остальные скорости иерархического ряда SDH, принимая во внимание, что в настоящий момент используется 5 уровней мультиплексирования. Используемые скорости иерархии SDH указаны в табл. 17.2. Заметим, что полезная скорость, т.е. скорость передачи собственно пользовательских данных, на любом уровне меньше указанной в таблице скорости, так как каждый транспортный модуль и контейнеры, находящиеся внутри него, несут в своих заголовках управляющую информацию. Например, максимальная полезная скорость канала STM-1 составляет 149.76 Мбит/с, а для канала STM-4 она составляет 514.62 Мбит/с.

Преимущества иерархии SDH перед PDH очевидны. Прежде всего, технология SDH с самого начала была ориентирована на использование оптического волокна в качестве среды передачи. Иерархический ряд скоростей SDH продолжился далеко за пределы всех иерархий PDH и в настоящее время достиг 40 Гбит/с. Была разработана новая структура фреймов (модулей), позволившая осуществлять маршрутизацию потоков в сети.

Иерархия SDH

Канал	Скорость передачи, Мбит/с	Канал	Скорость передачи, Мбит/с
STM-1	155,52	STM-64	9953,28
STM-4	622,08	STM-256	39813,12
STM-16	2488,32	–	–

Синхронность технологии SDH заключается не только в фиксированном размере модулей, но и в использовании центрального источника синхроимпульсов, что устранило вероятность нарушения синхронизации в случае потери информационных импульсов. Улучшилась управляемость сети независимо от ее сложности, повысилась надежность сети за счет резервирования. Кроме прочих достоинств в SDH появилась новая возможность – выделение полосы пропускания по требованию, т.е. динамически, в процессе самого сеанса связи путем предоставления соединению более высокоскоростного виртуального канала. Бесплатным, но очень полезным, приложением к этой возможности стала прозрачность системы для передачи практически любых цифровых потоков, синхронных и асинхронных, сформированных с помощью других технологий, таких как ATM (Asynchronous Transfer Mode), IP (Internet Protocol), FR (Frame Relay). В частности, поддержка технологии асинхронной передачи ячеек ATM в сетях SDH является очень перспективным решением для глобальных высокоскоростных сетей с передачей разнородного трафика различных служб. Расчет показывает, что при использовании для передачи DVB-C сигналов интерфейса E3 емкость канала STM-1 будет использоваться лишь на 58%, а в случае интерфейса T3 эта цифра составит 77%. Использование технологии ATM повышает эффективность использования канала примерно до 87%.

Аппаратная реализация мультиплексирования по схеме SDH упростилась за счет устранения оборудования промежуточных ступеней мультиплексирования до скорости 140 Мбит/с, которые теперь представлены просто в виде набора интерфейсов T1/E1, T2, E3/T3 и E4 синхронного мультиплексора SMX первого уровня. К такой экономии оборудования добавилась стандартизация и масштабируемость оборудования. Это упрощает наращивание ресурсов системы и оставляет возможность ее постепенной модификации, которая в ряде случаев выполняется путем замены только программного обеспечения без замены самих блоков оборудования. Переход на более высокую скорость передачи в линии осуществляется простой вставкой в аппаратную стойку новых модулей, рассчитанных на большую скорость. Оборудование SDH, в общем, выполняет те же функции, что и оборудование любой системы передачи – объединение сигналов, усиление (восстановление) сигналов и деление (ответвление) сигналов. Но реализуются эти функции принципиально по-другому, как правило, гораздо сложнее, чем в аналоговой системе передачи. Этим объясняется высокая стоимость цифрового оборудования. В частности, ответвление цифрового сигнала выполняется с помощью специального мультиплексора, поскольку здесь из общего потока требуется выделить нужный поток с определенной скоростью передачи. В системах PDH это потребовало бы еще и выполнения процедуры демультиплексирования. Кроме обычных функций аналоговых систем

Глава 17. Проектирование транспортной сети

передачи оборудование SDH выполняет и другие, присущие только цифровым системам передачи функции, такие как коммутация или маршрутизация цифровых потоков.

В комплексе оборудования сетей SDH можно выделить следующие стандартные функциональные модули:

- терминальные мультиплексоры TM, служащие для доступа в сеть SDH;
- магистральные мультиплексоры ADM, осуществляющие ввод и вывод потоков любого уровня мультиплексирования;
- концентраторы CM, позволяющие объединить несколько потоков одного уровня на распределительном узле;
- коммутаторы SDVC виртуальных контейнеров различных скоростей передачи;
- регенераторы RM, восстанавливающие (повторяющие) входной поток данного уровня.

Минимальным структурным элементом сети SDH является оптическая линия, называемая оптической секцией. Это участок от точки электрооптического преобразования до точки оптоэлектронного преобразования сигнала, т.е. от одного терминального SMX до другого. В состав оптической секции SDH входят регенераторные и мультиплексные секции. Регенераторные секции находятся между терминальными мультиплексорами и регенераторами. Мультиплексные секции находятся между терминальными мультиплексорами, магистральными мультиплексорами и коммутаторами. Регенераторные секции могут отсутствовать в линии, но по крайней мере одна мультиплексная секция в ней присутствует. Существует стандартная классификация оптических секций по протяженности, согласно которой выделяется три их типа, обозначаемых буквами I, S, L. Внутростанционная секция (I) имеет длину до 2 км только для волны 1310 нм, межстанционная короткая секция (S) имеет длину до 15 км, а межстанционная длинная секция (L) имеет длину от 40 на волне 1310 нм до 80 км на волне 1550 нм. Поскольку протяженность секции зависит и от длины волны, на которой ведется передача, то для разных передатчиков введены свои индексные обозначения: (1) – передатчик 1310 нм для волокна, соответствующего рекомендации G.652, (2) – передатчик 1550 нм для волокна, соответствующего G.652 или G.654, (3) – передатчик 1550 нм для волокна, соответствующего G.653. На основе этой классификации было введено стандартное обозначение секций в следующем формате:

$$[X] - [n] . [m] ,$$

где X – тип секции, n – уровень модуля STM, m – индекс оптического передатчика. Например, S-4.2 обозначает короткую межстанционную секцию, использующую оборудование мультиплексирования четвертого уровня STM-4 со скоростью передачи 622 Мбит/с и передатчик с длиной волны 1550 нм. Классификация секций приведена в табл. 17.3.

Все оборудование секции является оптическим, кроме терминальных мультиплексоров, которые могут быть электрооптическими. С помощью этого комплекса оборудования и можно реализовать сеть любой мыслимой топологии, от самой простой линейной до сложной структуры с сегментированием на основе кольца или звезды. Линейная структура создается с помощью двух терминальных TM, соединенных оптической линией передачи без ответвлений или с ответвлениями, организованными с помощью магистральных ADM ввода-вывода.

Классификация оптических секций

Секция	Уровень мультиплексирования		
	STM-1	STM-4	STM-16
Внутристанционная	I-1.1	I-4.1	I-16.1
Короткая межстанционная	S-1.1	S-4.1	S-16.1
	S-1.2	S-4.2	S-16.2
Длинная межстанционная	L-1.1	L-4.1	L-16.1
	L-1.2	L-4.2	L-16.2
	L-1.3	L-4.3	L-16.3

Сеть с кольцевой топологией строится аналогично линейной. Сеть звездообразной топологии реализуется с помощью тех же мультиплексоров и концентратора. Возможно комбинирование участков и сегментов с различными топологиями, с одинаковыми или разными уровнями SDH иерархии в них в рамках одной сети. Кольцевые сегменты могут соединяться с линейными или образовывать каскад колец. Бюджет оптического мультиплексора составляет около 25 дБ, что для длины волны 1550 нм соответствует дальности передачи около 80 км. При большей протяженности линии, превышающей допустимую для данной длины волны и полосы, в нее включается регенератор. Несмотря на рекомендуемые ограничения длины каждой секции, протяженность системы в целом практически не ограничена. Общая протяженность маршрута транспортной сети, собранной из таких оптических секций, может составлять сотни и даже тысячи километров.

На рис.17.7 показана схема организации цифрового потока на головной станции в оптическую транспортную линию с использованием технологии мультиплексирования SDH. Основу системы составляет мультиплексор SMX, который является в то же время оптическим передатчиком, имеет стандартные электрические интерфейсы для формирования потока STM-1 и, как правило, двоянный оптический интерфейс, используемый для увеличения емкости системы или для создания кольца с резервированием. На вход мультиплексора поступают цифровые ТВ сигналы в формате MPEG-2 и другие цифровые потоки.

WDM

Разработка технологии волнового мультиплексирования для оптической передачи, называемой также спектральным уплотнением, была связана с поиском новых путей дальнейшего увеличения пропускной способности транспортной сети. Повышение скорости было достигнуто путем одновременной передачи в каждом волокне нескольких оптических несущих. Технология WDM также как и TDM предоставляет системе передачи интерфейс физического уровня модели OSI.

Цифровая система передачи с технологией WDM показана на рис. 17.8. Каждый телевизионный сигнал преобразуется в поток импульсов с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) с кодером MPEG-2. Далее эти импульсные потоки объединяются цифровым мультиплексором (МХ) в единый поток, которым модулируется несущая частота оптического передатчика.

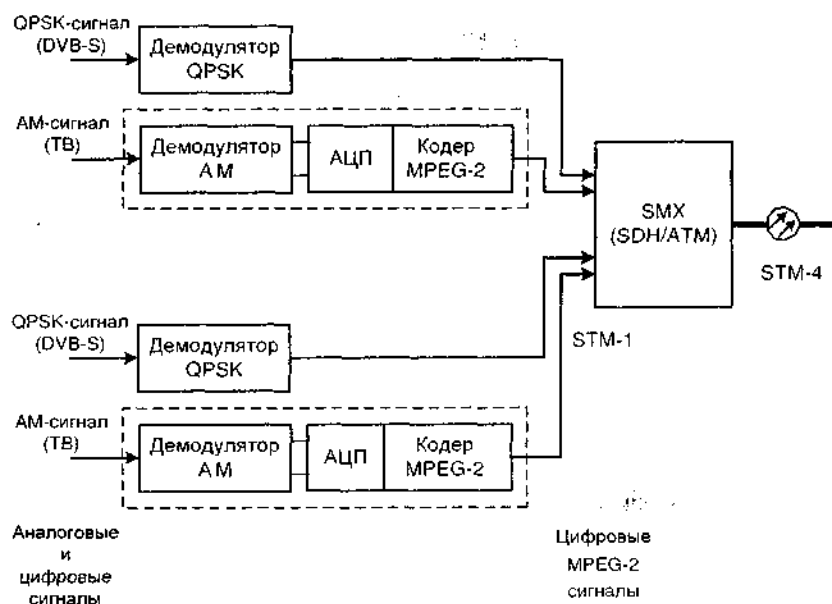


Рис. 17.7. Мультиплексирование на основе SDH

Скорости передачи могут быть различными, в зависимости от используемых интерфейсов и метода модуляции. В приведенной схеме введены две оптические несущие (f_1 и f_2), каждая из которых модулируется своим цифровым потоком в отдельном передатчике. Затем эти несущие объединяются в волновом мультиплексоре и подаются в общее оптическое волокно. На приеме все действия выполняются в обратном порядке. Как видно из рисунка, на приемной стороне после демультимплексирования и цифро-аналогового преобразования получаются те же аналоговые телевизионные каналы, которые присутствовали

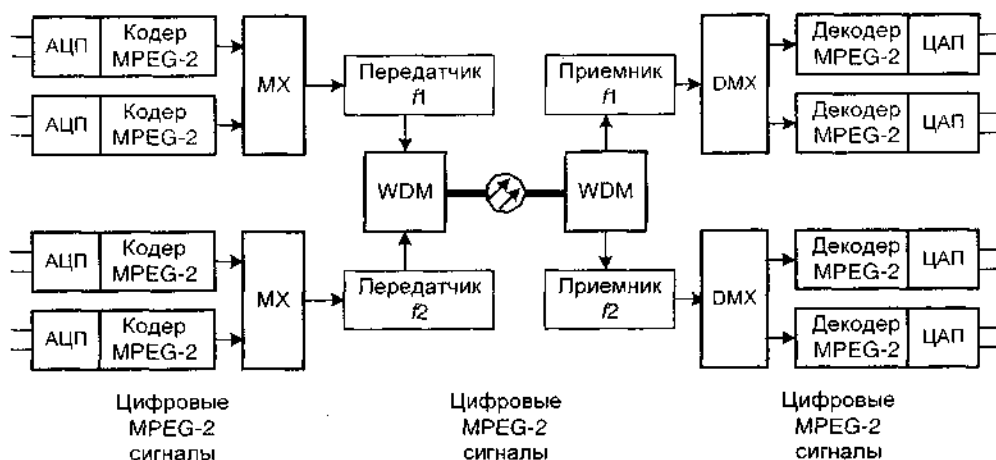


Рис. 17.8. Система передачи с WDM

на передающей стороне. Как и в случае аналоговой системы передачи с ЧМ, необходимо добавить по АМ модулятору на каждый канал, если исходные сигналы не были амплитудно-модулированными. Вся выполняемая обработка сигнала (преобразование аналогового сигнала в цифровой, мультиплексирование и демультимплексирование, преобразование из цифрового в аналоговый и окончательная АМ модуляция) увеличит стоимость системы, но полученное на выходе системы произведение показателя качества передачи и скорости передачи будет наиболее высоким.

Волновое мультиплексирование используется практически уже более 10 лет и первоначально было основано на объединении двух основных несущих 1310 нм и 1550 нм (2-го и 3-го окон прозрачности) в одном оптоволокне, что позволяло удвоить емкость системы. Многие стандартные системы SDH предлагают это сейчас, как один из вариантов конфигурации. Такие системы WDM называются широкополосными (разнос по длине волны 240 нм) в противовес узкополосным WDM, разнос в которых был на порядок ниже, около 24 нм, что давало возможность разместить в 3 окне (1550 нм) 4 канала. Такое деление систем кажется на данный момент не совсем корректным, так как у таких широкополосных систем WDM спектр не перекрывался, а состоял из двух изолированных полос. С другой стороны, в настоящее время формируется класс действительно широкополосных систем WDM, перекрывающих в смежных окнах прозрачности (3-м и 4-м) полосу около 84 нм от 1528 до 1612 нм. Рассчитывать на взаимную совместимость оборудования разных производителей систем WDM тогда не приходилось, поскольку необходимо было стандартизовать ряд используемых оптических несущих и принять единый канальный частотный план, чтобы дать производителям и кабельным операторам ориентир на будущее, а также классифицировать уже существующие WDM системы. Эту задачу в первом приближении решил Сектор стандартизации МСЭ, выпустив стандарт ITU-T G.692. В основу проекта стандарта был положен канальный частотный план с равномерным расположением несущих частот каналов с минимальным разносом (шагом) каналов на 0,1 ТГц, (100 ГГц). Выбранная в плане область частот покрывает стандартизованный диапазон 5,1 ТГц и практически соответствует диапазону длин волн (от 1528,77 до 1569,59 нм) амплитудно-волновой характеристики (ABX). Сейчас с помощью WDM можно передать до 1600 каналов в формате QAM-64 при скорости каждого канала 3 Мбит/с.

17.4. Радиорелейная транспортная линия

Радиорелейная линия может рассматриваться как средство передачи сигнала на транспортном уровне, во многом так же, как оптоволоконная линия. Как и в оптической линии, здесь может использоваться аналоговая или цифровая модуляция и цифровое мультиплексирование. Одно из различий состоит в том, что качество передачи в радиорелейной линии ниже, чем в оптической. Радиорелейная передача используется в системах КТВ для доставки телевизионных сигналов или другой информации из точки расположения головной станции. Частоты радиорелейной линии почти в 50 раз выше частот вещания в кабельной распределительной сети. На таких высоких частотах потери передачи в коаксиальном кабеле становятся очень большими, поэтому в антенном фидере, соединяющем СВЧ передающее оборудование радиорелейной линии с передающей антенной, используются металлические волноводы.

Глава 17. Проектирование транспортной сети

Существует множество причин, по которым выгодно использовать радиорелейные линии. Назовем некоторые из них:

- простая реализация одновременного обслуживания нескольких узловых станций;
- решение проблем с прокладкой кабеля в труднопроходимой местности (реки, леса, возвышенности);
- возможность быстрого развертывания мобильного телевизионного оборудования на передвижной станции;
- возможность передачи сигналов на большие расстояния без усиления;
- отсутствие ухудшения качества передачи, происходящего в длинном коаксиальном кабельном маршруте с каскадом из множества усилителей.

Проектирование радиорелейной структуры для системы КТВ подчиняется обычным принципам построения системы радиопередачи. К этому относится прямая видимость на пути передачи, обеспечение требуемых уровней передачи и усиления антенны, потери передачи в свободном пространстве (в зависимости от расстояния между антеннами). Такие факторы как ослабление сигнала в условиях осадков, отражение от земли, закругление поверхности земли усложняют процесс, но все они также должны быть учтены. Вопросы проектирования радиорелейных систем выходят за рамки нашего обсуждения, но разработчику системы КТВ редко приходится сталкиваться с такой задачей. Требуется лишь некоторое понимание того, каким образом радиорелейное звено влияет на характеристики системы КТВ в целом, и из каких структурных блоков состоит его оборудование. В системе КТВ может быть несколько радиорелейных линий. Распределение выходной СВЧ мощности головной станции по нескольким направлениям требует увеличения размеров антенн, повышения направленности передающей антенны и повышения мощности передатчиков. Каждое направление передачи необходимо рассчитывать и анализировать отдельно.

Обратимся к схеме оборудования передачи сигнала по радиорелейной линии. Для передачи каждого телевизионного канала требуется передатчик СВЧ. В каждой приемной точке требуется отдельный приемник для каждого телевизионного канала. Источником сигнала на головной станции может быть студийная видеокамера или видеомагнитофон или спутниковый ресивер. Для организации многоточечной передачи от одной передающей радиорелейной станции используются сумматоры, делители мощности и волноводные ответвители.

На рис.17.9 показана радиорелейная система с канальными передатчиками, расположенными на центральной головной станции (А). Для упрощения схемы показана система с двумя каналами, один из которых принимается головной станцией по эфиру, а другой подается с видеомагнитофона. Выходные сигналы передатчиков суммируются для получения группового сигнала. Затем с помощью волноводного делителя мощности энергия группового сигнала делится (в данной схеме пополам). Групповые сигналы меньшей мощности направляются по отдельным волноводным фидерам на индивидуальные передающие антенны. Каждая антенна ориентирована по направлению к своей приемной узловой станции, которых на этой схеме две (В и С). Расчет показателей системы передачи следует производить исходя из того, что выходная мощность в каждом направлении передачи снижается вдвое. Каждый одноканальный блок обрабатывает сигналы только одного канала. Одноканальное оборудование не созда-

17.4. Радиорелейная транспортная линия

ет каких-либо интермодуляционных искажений, однако в ней присутствуют другие формы искажений, такие как групповая задержка. После объединения сигналов возможно появление интермодуляции. Обратите внимание, что для передачи сигнала, полученного с эфира, необходим ТВ демодулятор. По другому каналу передаются видеосигналы с видеомagneтофона, и здесь демодулятор не требуется.

В радиорелейной системе возможна и двунаправленная многоканальная передача. На практике для этого широко используются волноводные циркуляторы и диплексеры для подключения нескольких передатчиков и/или нескольких приемников к единой СВЧ антенне.

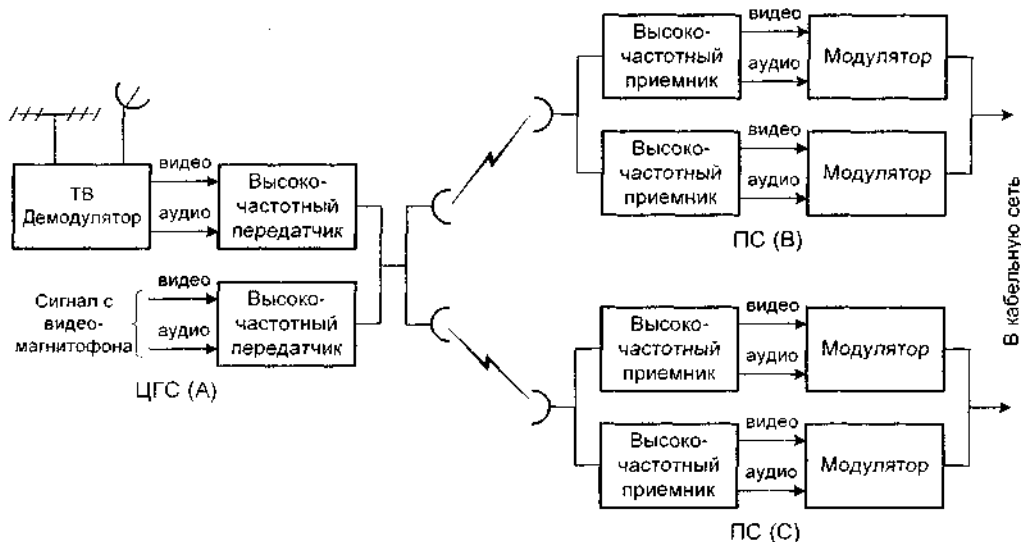


Рис. 17.9. Многоканальная радиорелейная система

На рис. 17.10 показана система с двумя каналами прямой передачи от станции А к станции В и одним каналом обратной передачи от станции В к станции А. Все три канала используют один волноводный антенный фидер и одну передающую антенну. Конечно, для этого сигналы всех этих каналов должны находиться в полосе, для которой предназначена антенна, головка антенны и волноводный фидер. Радиорелейное звено, включая антенну и волноводный антенный фидер, является широкополосным за пределами той точки, в которой комбинируются отдельные сигналы с выходов каналных конверторов. В ней используются блоки индивидуальной обработки каждого канала, выходы которых комбинируются на РЧ и затем вместе подаются в эфир. В передающем радиорелейном оборудовании последняя точка, в которой могут регулироваться отдельные РЧ несущие, находится в каналных конверторах перед устройством объединения сигналов. Соотношение между уровнями отдельных каналов устанавливается путем регулировки одноканальных блоков перед комбинированием их сигналов, а все операции с широкополосным сигналом выполняются в системе уже после комбинирования, что может вызвать некоторые затруднения при поиске неисправностей в системе.

Глава 17. Проектирование транспортной сети

Аналогично тому, как образование изгибов и деформация коаксиального кабеля может исказить его частотную характеристику, механические повреждения волновода радиорелейной линии также могут вызвать ухудшение его свойств. На частотах СВЧ обычно используется эллиптический волновод во всей антенно-фидерной линии или ее части. Эллиптический волновод легко изогнуть и повредить при установке. Современное оборудование обладает высокой надежностью и имеет достаточно простую процедуру настройки, но большинство проблем возникает при установке радиорелейного оборудования. Здесь необходимы опытные специалисты по высотному монтажу, а также специалисты, хорошо знающие волноводную технику и параболические СВЧ антенны. Механический монтаж оборудования это только первый этап установки и если он выполнен правильно, то на следующих этапах будет появляться меньше проблем.

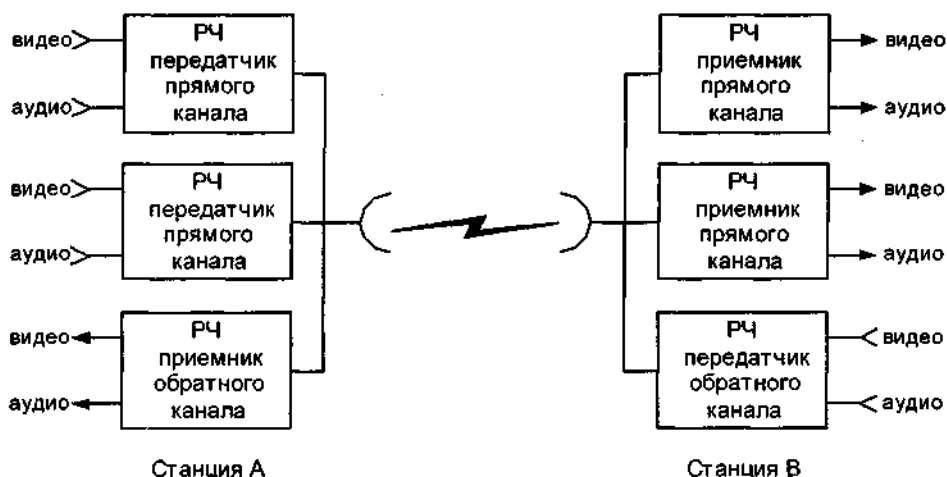


Рис. 17.10. Двусторонняя передача

Операторы, как правило, заключают контракт на выполнение высококвалифицированных работ по доставке и установке всего волноводного и антенного оборудования, а также по настройке и окончательной ориентации антенны. Большинство поставщиков радиорелейного оборудования предоставляет такие услуги, а их специалисты помогут во время установки обучить обслуживающий персонал сети КТВ настройке и эксплуатации радиорелейной системы.

На рис. 17.11 показано передающее многоканальное радиорелейное оборудование с конвертированием частоты. Путем настройки выходных уровней сигналов по каждому из каналов отдельно на головной станции можно получить желаемое значение уровня на входе локальной распределительной кабельной структуры, но следует помнить, что такая настройка по каждой отдельной несущей повлияет и на выходные уровни канальных передатчиков. Для обеспечения достаточной мощности излучения СВЧ передатчика сигнал каждого канала должен пройти через РЧ усилитель. Перед усилением сигналы с выходов всех конвертеров комбинируются на радиочастоте, поэтому этот усилитель мощности является широкополосным. Чтобы избежать проблем с интермодуляцией, каждый канал переносится на более высокую частоту с помощью ин-

17.4. Радиорелейная транспортная линия

вертора. Если с помощью такого оборудования в системе КТВ требуется обслуживать четыре, пять или шесть приемных станций, есть опасность подойти к границе допустимого ухудшения качества передачи.

Хотя требование предельной длины радиорелейной линии не позволяет превышать расстояние прямой видимости, многократное деление выходного сигнала иногда требует компенсации выходного уровня путем повышения мощности передатчика. С другой стороны, когда множество несущих проходит через широкополосный усилитель, в сигнале появляются интермодуляционные искажения, следовательно, может потребоваться ограничение выходной мощности передатчика.

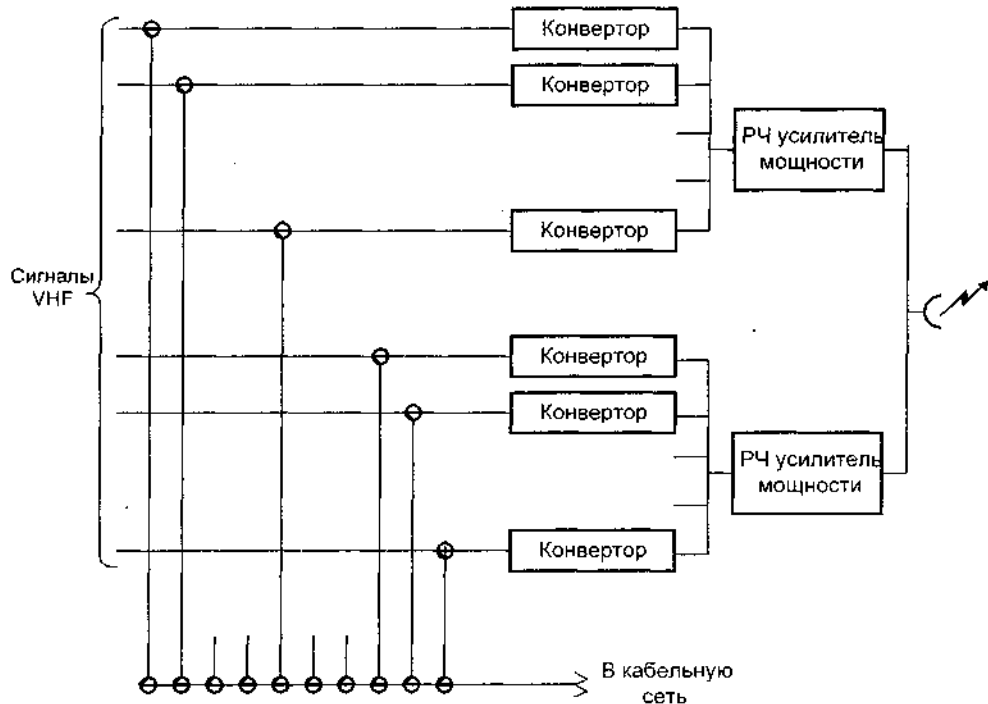


Рис. 17.11. Радиорелейное оборудование с групповым усилением

Ввиду этого для ограничения интермодуляции маломощные передатчики допускают комбинирование сигналов с выходов не более чем восьми конверторов, а, следовательно, в полосе пропускания широкополосного выходного усилителя может разместиться до восьми каналов. Если требуется передать более восьми каналов, например, придется установить еще один широкополосный усилитель. Канальная емкость сегодняшнего радиорелейного оборудования расширена до 54 каналов, причем, для передачи всех каналов используется одна и та же антенная установка. На рис. 17.11 показано, что сигналы частотного диапазона VHF могут направляться с выхода головной станции прямо в распределительную сеть с помощью системы ответвителей и сумматоров одновременно с радиорелейной передачей. Телевизионные сигналы должны быть модулированы на радиочастоте перед их подачей на передающее оборудо-

Глава 17. Проектирование транспортной сети

дование. Невозможно обойтись только преобразованием частоты спутникового сигнала или сигнала от одноканального радиорелейного оборудования без процесса его демодуляции и повторной модуляции, потому что сигналы со спутника модулированы другим методом, и, следовательно, не могут быть приняты абонентскими телевизионными приемниками. Если присутствуют изначально АМ сигналы, например, от наземных радиовещательных источников, то можно напрямую подать эти сигналы на входы радиорелейного оборудования, понизив частоты эфирных UHF каналов (полоса от 470 до 800 МГц) в VHF каналы (полоса от 50 до 400 МГц).

Другая конфигурация многоканального радиорелейного оборудования предусматривает установку узкополосного канального усилителя на выходе каждого канального конвертора. Это позволяет повышать уровень выходного сигнала, не опасаясь роста интермодуляционных искажений в каждом одноканальном блоке. Стоимость этого оборудования более высока, но иногда его использование может быть единственным возможным решением, например, в случаях передачи на очень большое расстояние, передачи по многим направлениям и сильных отражений от поверхности земли. На рис. 17.12 показана схема такой радиорелейной станции для нескольких телевизионных каналов.

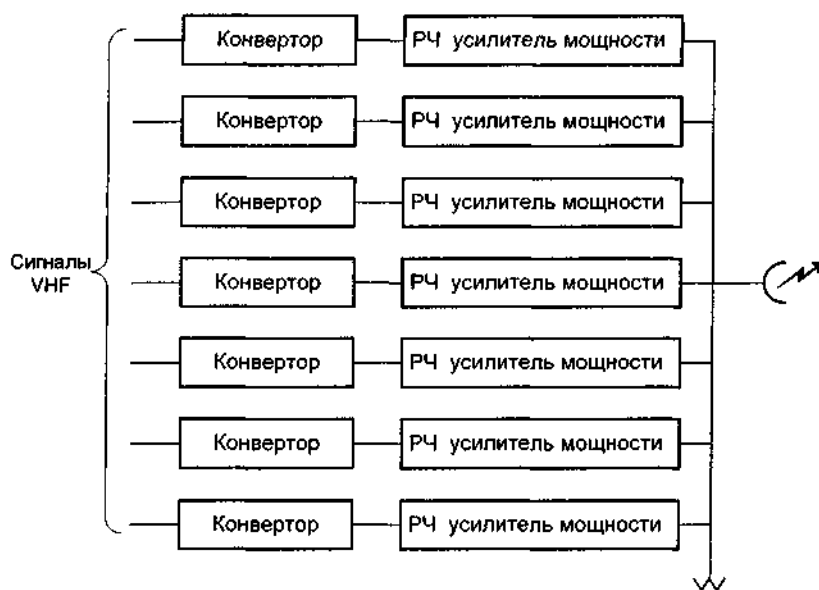


Рис. 17.12. Радиорелейное оборудование с канальным усилением

Поскольку для передачи каждого телевизионного канала требуется индивидуальный РЧ усилитель, конфигурация оборудования не зависит от количества каналов. При увеличении количества каналов будет происходить только наращивание этой конфигурации путем установки дополнительного блока.

Радиорелейный приемник устанавливается, например, на узловой станции системы КТВ. Устройство СВЧ приемников радиорелейных линий для обеих конфигураций одинаково и демодуляция не входит в процесс обработки сигнала на приеме. Локальный генератор обеспечивает преобразование частоты

17.4. Радиорелейная транспортная линия

всех входящих СВЧ несущих, т.е. все РЧ сигналы конвертируются с понижением частоты обратно в диапазон VHF. Каждый приемник, являющийся широкополосным прибором, вносит свои интермодуляционные искажения и шум. При достаточном уровне РЧ сигнала на входе каждого приемника и правильном расчете интермодуляции и шум, вносимые системой, можно удерживать на допустимом уровне. Когда в радиорелейной системе увеличивается количество передаваемых каналов, на приемной станции не требуется никаких изменений, хотя на передающей стороне необходимо дополнительное оборудование для каждого канала. На выходе приемника все передаваемые сигналы находятся на частотах VHF и при достаточном уровне могут напрямую подаваться в коаксиальную распределительную сеть. Перед подачей всего набора каналов в распределительную сеть можно, если требуется, включить дополнительные сигналы, например, сигналы локальных радиовещательных станций или специальные пилот-несущие для автоматической регулировки усиления в распределительной сети.

На оборудовании с групповым усилением труднее обеспечить высокое значение граничного ослабления сигнала, особенно в случае множества радиорелейных направлений передачи. Иногда эту трудность можно преодолеть, просто выбрав антенну большего размера с более высоким усилением. Один усилитель задействован в передаче сразу нескольких каналов, поэтому при выходе из строя усилителя теряются все каналы одновременно. Оборудование с канальным усилением является более надежным в этом смысле, поскольку при падении мощности любого из РЧ усилителей теряется только один телевизионный канал. Система с канальным усилением обеспечивает более надежное и дешевое резервирование каналов с помощью переключения сигнала на резервный блок. Передающее оборудование должно устанавливаться в помещении с регулируемым кондиционированием воздуха и поддержкой постоянной температуры для продления срока безотказной работы и улучшения стабильности частоты. В оценку стоимости любого радиорелейного оборудования должна быть включена стоимость всех устройств и узлов, необходимых для взаимодействия с остальной частью системы. Оператор, намеревающийся использовать в своей системе КТВ радиорелейную транспортную подсистему, обязан получить лицензию Госсвязьнадзора. Комплексу радиорелейного оборудования должен быть присвоен соответствующий классификационный тип (по канальной емкости, мощности, частотам) перед тем, как будет получено разрешение на его использование. Лицензированные радиорелейные передатчики могут обслуживаться только операторами, имеющими действующую лицензию.

17.5. Волоконно-оптическая магистраль

В последнее время все чаще оптическое волокно рассматривается как средство передачи не только на транспортном, но и на магистральном уровне. Магистральная линия, напомним, вместе с домовой распределительной сетью составляет так называемую "последнюю милю", которая распространяется от узловой станции до конечного абонента. Ранее на этом интервале применялся только коаксиальный кабель, правда и сейчас ситуация изменилась не сильно, особенно в домовых сетях, где он преобладает. Это связано с тем, что высокие затраты на оптическое оборудование не всегда окупаются и в ряде проектов коаксиальная сеть является оптимальным решением по соотношению цены и

Глава 17. Проектирование транспортной сети

качества. Тем не менее, магистраль может выполняться на оптике частично или полностью, т.е. включать оптический участок и коаксиальные участки или только оптические участки. Рассмотрим подробнее оптическую часть магистральной сети, поскольку она тесно связана с транспортной оптической сетью.

Оптическая часть магистральной сети может иметь, как и транспортная сеть, кольцевую или древовидную топологию. Оптическая магистраль начинается на выходе узловой оптической станции – оптического узла. Узловая станция является основным элементом магистральной сети. От ее характеристик зависит качество сигнала в сегменте и допустимый размер сегмента. Следует отметить, что строительство крупной кабельной сети часто начинается именно с узловых станций. Определяющим фактором для выбора узлового оборудования является количество абонентов, которое должен обслуживать один оптический узел, т.е. емкость распределительного сегмента. Обычная емкость сегмента колеблется от 20 до 40 тысяч абонентов. С точки зрения структуры узловая станция в общем случае является узлом оптического переоприема сигнала, включающим приемное и передающее оптическое оборудование. На входе узловой станции имеется оптический приемник, получающий сигнал от ЦГС по транспортной линии. С выхода узловой станции усиленный сигнал может направляться по нескольким оптическим магистралям, поэтому на одной из функций узловой станции является деление сигнала. Для обслуживания каждого магистрального маршрута на узловой станции устанавливается отдельный оптический передатчик, получающий сигнал с выхода делителя. Одна магистраль обычно обслуживает от 2000 до 5000 абонентов. В каждой промежуточной точке оптической магистрали устанавливается магистральный оптический приемник, рассчитанный на обслуживание небольшого числа абонентов (от 200 до 500). К выходу оптического приемника подключается, как правило, коаксиальная распределительная сеть, обслуживающая многоэтажный дом или небольшую группу домов. Заметим, что таким образом на уровне сегмента также реализуется принцип сегментирования обслуживаемой области, только аналогом сегмента здесь является магистраль.

Структурная схема одного из вариантов узловой станции показана на рис.17.13. Помимо деления и усиления сигнала оптический узел может выполнять функции добавления в базовый пакет дополнительных ТВ каналов и услуг, изменение модуляции сигнала и преобразование цифрового сигнала в аналоговый. На узловые станции обычно возлагаются также функции сетевого менеджмента, в результате чего управление сетью становится распределенным, значительно разгружается сеть и вся процедура управления упрощается по сравнению с централизованным вариантом.

Целью разработчика, разумеется, является минимизация стоимости оптической системы. Если для этого используются простые станции без возможности введения дополнительных сигналов, то очевидным недостатком становится невозможность реализовать в сегментах различные пакеты каналов и услуг. Другим способом снижения стоимости является увеличение количества абонентов в сегменте за счет увеличения числа абонентов, подключенных к каждому магистральному оптическому приемнику. Однако, к этому нужно подходить разумно и не забывать, что в кабельных сетях с поддержкой интерактивных услуг последует увеличение нагрузки на обратный канал. Это потребует установки дополнительных оптических приемников и количество абонентов, приходящихся на один оптический приемник, в результате все равно умень-

шится. Кроме этого, количество управляющей информации в большом сегменте увеличится. С точки зрения эффективности сетевого менеджмента, в задачи которого входит контроль оплаты услуг, управление доступом абонентов в сеть, проведение счетов и техническая поддержка оборудования, оператору удобнее иметь небольшие сегменты, емкость которых не превышает 30 тысяч абонентов. Выигрыш в стоимости первоначального строительства может оказаться мнимым, если он будет достигнут в ущерб надежности и управляемости сети, поэтому выгода от завышения размера сегмента является спорной.

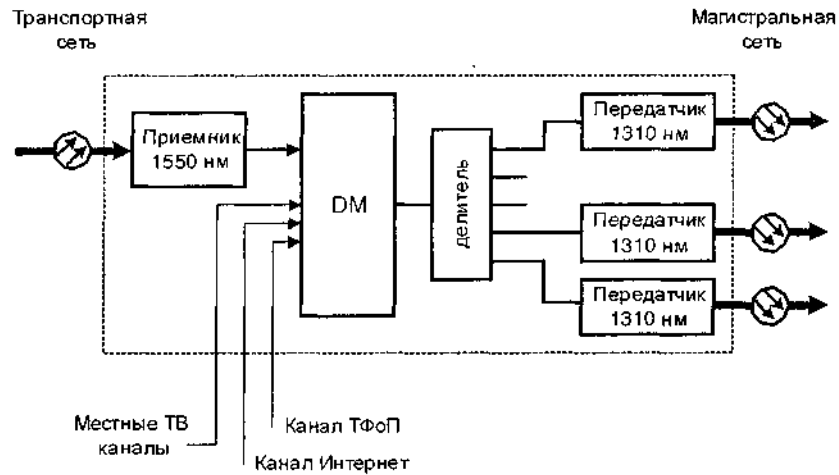


Рис. 17.13. Оптическая узловая станция

В примере, приведенном ранее в этой главе, один сегмент охватывает район со средним количеством абонентов 20 тысяч. Допустим, что на начальном этапе эксплуатации к одному магистральному оптическому приемнику подключается 2000 абонентов, следовательно, для обслуживания всего сегмента потребуется установить 10 приемников. Допустим также, что оптическая часть магистральной сети построена по принципу кольца, преимущество которого состоит в обеспечении максимальной надежности за счет наиболее полного резервирования – по оптическим узлам и по направлениям оптической передачи. Такое резервирование применяется в интерактивных сетях с интеграцией услуг, а если система ориентирована только на предоставление сигналов ТВ вещания, то требования по надежности системы могут быть снижены и достаточно древовидной топологии. В случае кольцевой топологии получается структура, показанная на рис. 17.14.

Места расположения узловых станций по возможности выбираются таким образом, чтобы минимизировать расстояния от них до магистральных оптических приемников, т.е. вблизи центра сегмента. На начальном этапе эксплуатации сети используется весьма незначительная доля ее потенциальной емкости, поэтому рекомендуется проектировать систему гибкой и адаптируемой для будущего развития. Это означает, что число и абонентская емкость оптических приемников, топология сети и количество волокон в оптическом кабеле нужно

Глава 17. Проектирование транспортной сети

выбирать так, чтобы в случае расширения сегмента или увеличении количества абонентов в нем оставалась возможность подключения к приемникам новых абонентов или, по крайней мере, возможность установки в том же сегменте дополнительных приемников без реконструкции самой магистральной сети. В этом смысле неоспоримыми преимуществами обладает модульный принцип организации оборудования узлов, который позволяет, начиная с минимальной конфигурации, модифицировать узел в дальнейшем до схемы с полным резервированием, а также с функциями автоматического контроля состояния канала и дистанционного управления.

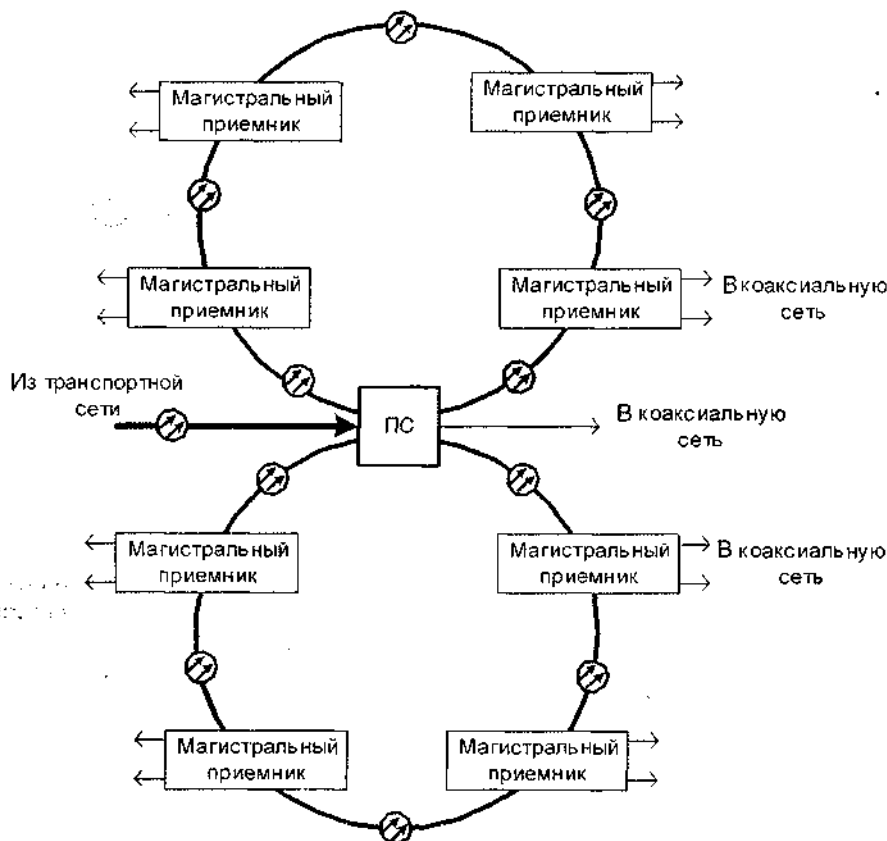


Рис. 17.14. Кольцевая оптическая магистраль

Оптический кабель лучше использовать стандартных марок с количеством волокон из следующего ряда: 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 72, 80, 120, 144. Несмотря на то, что часть волокон в кабеле может никогда не будет использоваться, стандартизация позволяет уменьшить количество типов оптического кабеля и, как следствие, снизить затраты на его приобретение.

Оценить стоимость строительства оптической части отдельного сегмента можно, исходя из его предполагаемой абонентской емкости, протяженности магистралей и выбранной рабочей длины волны в магистральных. Существуют возможности использования в оптической части последней мили приемо-

передающего оборудования, работающего на волне 1310 или 1550 нм. В первом варианте от узловой станции до последнего магистрального оптического приемника используется волна 1550 нм, а во втором варианте на этом интервале используется волна 1310 нм. В транспортной сети почти всегда сигналы передаются на волне 1550 нм (исключая технологию WDM), поэтому во втором случае оборудование оптического узла усложняется и решение становится более дорогим. Однако, передатчики и оптические кабели, работающие на длине волны 1550 нм имеют более высокую стоимость. Обычное соотношение стоимости передатчиков с рабочей длиной волны 1310 нм мощностью 10 дБм и с рабочей длиной волны 1550 нм мощностью 16 дБм составляет один к четырем (приблизительно одинаково для всех производителей). Зная величину бюджета оборудования того и другого типа, расстояния между оптическим узлом и оптическими приемниками и потери в кабеле для обеих длин волн, можно вычислить достижимую область охвата оптической магистрали и стоимость кабеля. Затем, зная общее количество магистральных оптических приемников в сегменте, можно определить стоимость приема-передающего оборудования магистрали. Сумма этих двух составляющих даст полную стоимость строительства оптической части сегмента. Следует учитывать, что в магистрали с кольцевой топологией можно сэкономить на количестве оптических приемников (сократить на 1), если подключить часть абонентов сегмента непосредственно к узловой станции посредством коаксиального кабеля.

Резюме

Роль транспортного уровня заключается в передаче сигналов на большие расстояния, а не в распределении сигнала конечным потребителям информации. Транспортная сеть является отдельной подсистемой системы КТВ, поэтому в ней можно использовать любой удобный метод модуляции сигнала, отличный от метода модуляции в распределительной подсистеме, если это оправдано практическими соображениями. Частотная модуляция ЧМ позволяет получить значительные преимущества в плане повышения защищенности сигнала по сравнению с АМ. Модуляция QAM дает еще большие преимущества, поскольку имеет дело с цифровым сигналом. Подсистема, использующая отличные от АМ методы модуляции, должна обеспечивать процедуру трансмодуляции, чтобы предоставить на входе распределительной кабельной сети сигналы в амплитудно-модулированном виде, принимаемые обычными телевизорами. Если трансмодуляции не выполняется на узловых станциях, то эту функцию должно реализовывать оконечное абонентское оборудование. Качество передачи в транспортной сети должно быть гораздо более высоким, чем в остальной части системы.

В качестве транспортной линии может выступать радиорелейная или, чаще, волоконно-оптическая линия передачи. Радиорелейные линии способны предоставлять относительно широкую полосу для передачи сигналов, посредством которой телевизионные сигналы могут модулироваться по амплитуде или частоте и передаваться в аналоговом виде по технологии частотного мультиплексирования. Однако, оптические системы передачи представляют собой наиболее эффективное решение для транспортной сети. В оптической транспортной линии тоже может применяться аналоговая передача, но реализовать все преимущества позволяет только цифровая передача, использующая временное

Глава 17. Проектирование транспортной сети

мультиплексирование. Для цифровой системы определяется заранее ряд стандартных скоростей передачи или первый (порождающий) член ряда и правило формирования этого ряда. В последнее время для цифровой передачи используется синхронная иерархия SDH, в которой модуль STM-1 передает цифровой поток со скоростью 155 Мбит/с. Максимальная скорость передачи этой иерархии в настоящее время составляет 40 Гбит/с. Аналоговая транспортная линия имеет преимущества по простоте оборудования и стоимости, а цифровая – по качеству передачи, а также протяженности системы.

Наиболее распространенными методами скоростной передачи цифровой информации на транспортном уровне, использующем оптическое волокно как среду передачи, являются две технологии уплотнения каналов – технология цифрового временного мультиплексирования TDM и технология волнового мультиплексирования WDM. Схема временного мультиплексирования TDM чаще реализуется на основе PDH, однако в большинстве строящихся сейчас сетей используется более совершенная иерархия SDH. Технология WDM пока применяется очень редко в силу своей дороговизны и не до конца исчерпанных возможностей технологии TDM.

Оптическая часть магистральной сети может иметь кольцевую или древовидную топологию. Оптическая магистраль начинается на выходе оптического узла. Оптический узел является основным элементом магистральной сети, от его характеристик зависит качество сигнала в сегменте и допустимый размер сегмента, поэтому строительство крупной кабельной сети часто начинается именно с узловых станций. Определяющим фактором для выбора узлового оборудования является количество абонентов, которое должен обслуживать один оптический узел. Оценить стоимость строительства оптической части сегмента можно, исходя из его предполагаемой абонентской емкости, протяженности магистралей и выбранной рабочей длины волны в магистральных. В оптической части магистральных линий может использоваться приемно-передающее оборудование, работающее на длине волны 1310 или 1550 нм. В транспортной сети почти всегда сигналы передаются на волне 1550 нм (исключая технологию WDM), и в этом случае система становится более дорогостоящей.

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

В этой главе освещаются некоторые вопросы проектирования и построения широкополосных волоконно-коаксиальных кабельных систем, на основе которых развертываются современные многофункциональные системы кабельного телевидения. Кратко освещены основные черты коаксиальной и оптической систем передачи. Обсуждаются аспекты корректного объединения этих двух технологий в единой системе, которая называется гибридной системой передачи. Согласно определению, такая система передачи образована коаксиальными и оптоволоконными звеньями передачи и предназначена для распределения сигналов телевидения, а также сигналов других служб. Применение гибридной технологии построения кабельной сети представляет собой наиболее эффективное решение для больших и средних проектов с емкостью всей области обслуживания не менее 50 тысяч абонентов.

В целом все технические приемы и методики, применяемые для построения оптической и коаксиальной частей, были изложены в предыдущих главах. Здесь будут даны только краткие рекомендации по расчету обеих частей, акцентирующие внимание на тех моментах, которым разработчик должен уделить внимание.

Современные системы КТВ строятся не только как гибридные, но и как интерактивные, т.е. с обратным каналом. Отдельные аспекты систем с обратным каналом уже освещались в разных главах, например, при рассмотрении усилителей и оптических систем передачи. В связи с этим здесь будут рассмотрены только некоторые особенности проектирования обратного канала. Экскурс в двунаправленные системы будет полезен перед изучением двух следующих глав, касающихся абонентского оборудования и передачи данных.

18.1. Структура гибридной системы передачи

Соединив в рамках одной сети две технологии передачи, коаксиальную и оптическую, можно создать систему, сочетающую достоинства каждой из них или, по крайней мере, минимизирующую их недостатки. Комбинированная система будет состоять из коаксиальных и оптоволоконных звеньев передачи. Такие системы называются гибридными волоконно-коаксиальными или HFC (Hybrid Fiber Coaxial). Сильное место оптических звеньев передачи в том, что они не нуждаются в множестве промежуточных усилителей для доставки сигнала в крайние точки обслуживаемой области, что улучшает не только качество передачи, но и надежность системы. Поэтому оптические звенья широко применяются в гибридных системах для передачи сигнала на большие расстояния. Коаксиальная технология является очень эффективной и экономичной при организации разветвленной распределительной сети с помощью ответвителей, особенно для обслуживания большого количества абонентов, расположенных случайным образом в пределах данной области.

Глава 18. Гибридные системы передачи

Обслуживаемая область системы кабельного телевидения в гибридной архитектуре сегментируется или подразделяется на некоторое количество меньших областей (сегментов), в каждой из которых создается как бы своя независимая распределительная система. Оптические звенья в каждой области будут использоваться в качестве магистральных линий, переносящих сигнал на значительные расстояния и доставляющих его к коаксиальным широкополосным структурам небольшой протяженности, которые выполняют функцию распределения сигнала непосредственно абонентам через систему ответвителей и делителей. Коаксиальные сегменты гибридных структур будем ограничивать двумя или тремя усилителями в каскаде, поэтому проблема температурной компенсации и выравнивания уровня сигнала сильно упрощается. Поскольку необходимо обеспечить достаточную мощность сигнала на входе каждого оптического приемника, можно просто увеличить оптическую мощность, чтобы доставить сигнал на большое расстояние по волоконной линии к обслуживаемой области, и подключить к выходу приемника каскад коаксиальных усилителей распределительной сети, сегментируя таким образом обслуживаемую область и повышая надежность системы. Сегмент распределительной системы обслуживается одним оптическим приемником, установленным на подголовной станции, называемой также оптическим узлом.

На рис. 18.1 изображена часть системы КТВ с одним сегментом, который обслуживается одним волокном и одним оптическим узлом. Сегмент здесь показан условно как простейшая коаксиальная распределительная сеть древовидной топологии с одной магистралью. Однако, сегмент, как было выяснено в предыдущей главе, может включать несколько магистралей, в том числе оптических, имеющих любую топологию.

Используя такую архитектуру, можно доставлять все сигналы в обслуживаемую область по нескольким параллельным оптическим волокнам, каждое из которых будет непосредственно обслуживать один или более узлов. К каждому узлу подключен свой коаксиальный каскад усилителей, ограниченный по длине. На рис. 18.2 показан принцип сегментирования обслуживаемой области с двумя узлами. Каждое из параллельных волокон требует собственного оптического передатчика, поэтому каждая подсистема гибридной системы будет независима от всех других. Это решение кажется очень простым, но с ним связаны некоторые практические вопросы, главным из которых является допустимый размер сегмента или зона охвата сегмента. Решение о том, насколько большим может быть узел, принимается на основании тех требований, которые предъявляют различные службы к ресурсам системы передачи. В первую очередь это касается интерактивных цифровых служб, поскольку прямые каналы службы телевизионной передачи с направлением передачи от головной станции к абонентам являются идентичными для всех абонентских станций и, следовательно, размер области, обслуживаемой одним оптическим приемником, не будет зависеть от этого фактора.

Для предоставления таких служб, как, например, доступ в Интернет, от системы требуется способность работать в двунаправленном режиме и эта способность должна поддерживаться в каждой абонентской точке. Сегодня необходимо создавать системы передачи с интеграцией сразу нескольких служб, требующих двунаправленной передачи.

Способ адаптации и интеграции такой службы в систему может очень сильно повлиять на структуру гибридной сети и размер ее сегментов.

18.1. Структура гибридной системы передачи

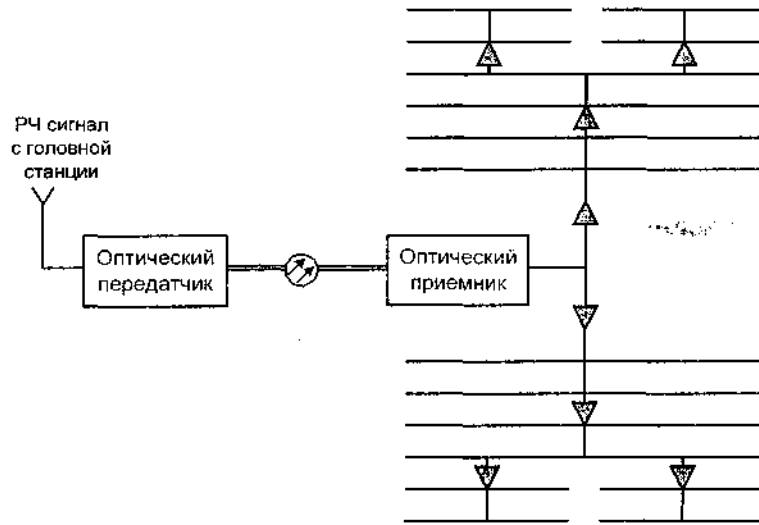


Рис. 18.1. Сегмент гибридной системы

Сложность при этом заключается в сильном различии требований разных интерактивных служб к ресурсам сети. Существуют довольно сложные количественные методики оценки размера сегмента, основанные на математическом моделировании интенсивностей потоков данных различных служб при разном числе абонентов в сегменте и разных способах мультиплексирования потоков нескольких служб с разными характеристиками. Здесь эти методики не рассматриваются в силу их специфичности и необходимости привлечения серьезного математического аппарата из теории массового обслуживания, что выходит за рамки данной книги. Исследования показывают, что оптимальный размер сегмента колеблется от 10000 до 30000 абонентов, в зависимости от набора предоставляемых сетью служб.

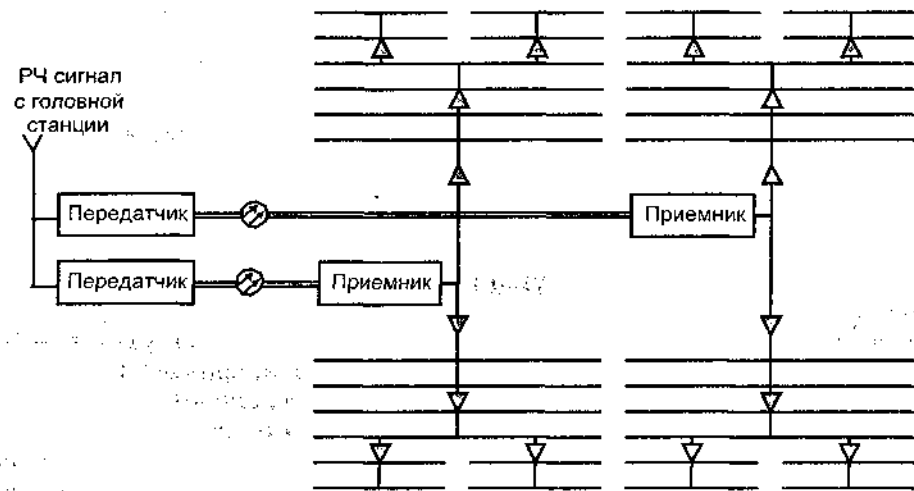


Рис. 18.2. Сегментирование области обслуживания

Глава 18. Гибридные системы передачи

Зачастую решение о размере сегмента принимается разработчиком эмпирически или, даже, чисто интуитивно, что приводит впоследствии к плохой управляемости системы и частым отказам в обслуживании.

Большое значение для определения размера сегмента имеет и отношение C/N в обратном канале, которое не должно быть ниже значения, определенного в EN-50083. Допустим, что абонентская емкость сегмента, включающего 5 магистралей, составляет 10000 абонентов. Каждая магистраль в этой системе будет обслуживать в среднем 2000 абонентов с помощью 10 магистральных оптических приемников, следовательно, на каждый приемник будет приходиться по 200 абонентов. При условии, что отношение C/N в каждой оптической линии равно 35 дБ, для 10 оптических веток получим общее C/N , равное 25 дБ. Одной из полезных функций сети является возможность дистанционного управления обратными каналами и отключения любого из них в случае, когда он поражен шумами и мешает работе всей сети.

Характеристики некоторых служб, предоставляемых сетью, напрямую связаны с телевидением. Примером является служба телевизионного вещания с оплатой за просмотр, где оператор имеет возможность периодически открывать или закрывать доступ любой абонентской станции к просмотру программ в соответствии с индивидуальными условиями обслуживания. При этом передается поток опросного типа от головной станции на абонентские станции, которые, в свою очередь, поддерживают цифровую адресацию с одной несущей для всех станций. Головная станция посылает запросы на все абонентские станции для того, чтобы установить текущий статус данной станции относительно каждой из передаваемых служб или позволить ей изменить свой статус и подтвердить авторизацию станции, т.е. разрешить ей допуск ко всем или некоторым службам. Другие службы кабельной сети не связаны напрямую со службой телевизионного вещания. Они даже могут предоставляться другими корпоративными организациями, использующими эту же передающую систему. Примерами таких служб является, пожарная и охранная сигнализации. В любом из вышеназванных случаев система обращается к каждой станции индивидуально и поочередно, используя общий сигнал с индивидуальным цифровым адресом, и так же индивидуально и поочередно каждая станция получает разрешение на обратную передачу, т.е. на передачу своих данных на головную станцию, снова используя общий сигнал. Такой метод информационного обмена называется режимом с опросом и разделением времени. За одну минуту могут быть опрошены сотни станций. Поскольку все станции не обязаны отвечать одновременно, то задержки при передаче служебного сигнала в обоих направлениях вполне приемлемы.

Режим опроса с разделением по времени сегодня используется повсеместно в обычных полностью коаксиальных системах передачи, и следует заметить, что применяемая там технология передачи на основе широкополосного аналогового оборудования в равной степени применима и к гибридной волоконно-коаксиальной структуре. Размер узла гибридной сети в этом случае диктуется количеством абонентских станций, которые можно опросить и получить от них ответ за определенный разумный промежуток времени. Очевидно, при большом разбросе допустимого числа абонентских станций, приходящихся на один приемник для разных служб (от 200 до 500) трудно определить размер сегмента гибридной сети. Если при построении сети состав и число служб в сети до конца не ясны, то выбор размера узла выполняется во многом произвольно, при условии, что должен остаться резерв для расширения сети и размещения дополнительных станций.

Перспективным и заманчивым является предоставление в кабельной сети телефонной службы, которая относится к классу коммутируемых служб. Для организации информационного обмена между отдельными абонентами сначала устанавливается связь между абонентом, инициирующим сеанс связи, и первым коммутатором телефонной сети. При этом действуют гораздо более строгие требования, чем, при передаче сигналов телевидения. Для телефонной службы необходимо установление временного соединения по требованию между двумя любыми абонентскими станциями из тысяч или миллионов возможных в произвольный момент времени. Кроме того, в коммутируемом соединении нужно поддерживать полноценный разговор в реальном времени на период всего сеанса связи, когда любой из двух абонентов в любой момент времени может слышать другого. В настоящее время довольно широкое распространение получила и служба телеконференции, в которой участвуют сразу несколько абонентов в режиме живого разговора, причем, каждый из участников сеанса связи должен иметь связь со всеми остальными. Эта служба также радикально отличается от обычной службы кабельного телевидения, в которой все сигналы предоставляются сразу всем авторизованным абонентам в течении всего времени, т.е. без коммутации. Независимо от используемых в прямом и обратном каналах методов модуляции и мультиплексирования для этого должно быть выделено некоторое количество телефонных линий. Обычно такие линии предоставляются на периодической основе, т.е. ограниченное число линий будет выделено и передано разным волокнам, обслуживающим разные узлы в системе. Заметим, что пока почти повсеместно сети кабельного телевидения, телефонные сети и сети передачи данных сосуществуют параллельно и отдельно друг от друга.

Таким образом, первым шагом в разработке гибридной системы является определение размера сегмента. В случае отсутствия требований к расширяемости сегмента можно с помощью оборудования одной волоконно-оптической линии обслуживать два сегмента, разделяя одно волокно с помощью оптического делителя. В этом случае потребуется два оптических приемника, но система будет работать на одном оптическом передатчике и одном общем волокне. Спектр прямого канала будет доступен во всех абонентских точках, обслуживаемых данным волокном. На рис. 18.3 показана именно такая конфигурация на основе одного передающего волокна.

На рис. 18.4 представлено оптическое звено с обратным каналом, для которого выделено отдельное волокно (верхняя часть рисунка). В нижней части рисунка показан вариант двунаправленной системы, в которой для передачи сигнала в волокне используется технология WDM, позволяющая мультиплексировать сигналы прямого и обратного каналов в одном волокне. В точке интерфейса оптического звена с коаксиальной частью системы спектры прямого и обратного каналов разделяются двунаправленными фильтрами, находящимися в радиочастотных коаксиальных усилителях. Если же для обратной передачи используется отдельное волокно, то спектр обратного канала занимает полностью это волокно и подается в него отдельным оптическим передатчиком.

Если используется двунаправленное волокно, то спектр обратного канала подается в направлении оптического передатчика, разумеется, на другой оптической частоте, а этого выход волокна подключается к соответствующему порту оборудования WDM, как показано на рис. 18.4. Решение о том, использовать для обратного канала отдельное волокно или одно волокно для обоих направлений передачи, зависит в основном от стоимости проекта. Оба метода достаточно надежны и в равной мере технически применимы.

Глава 18. Гибридные системы передачи

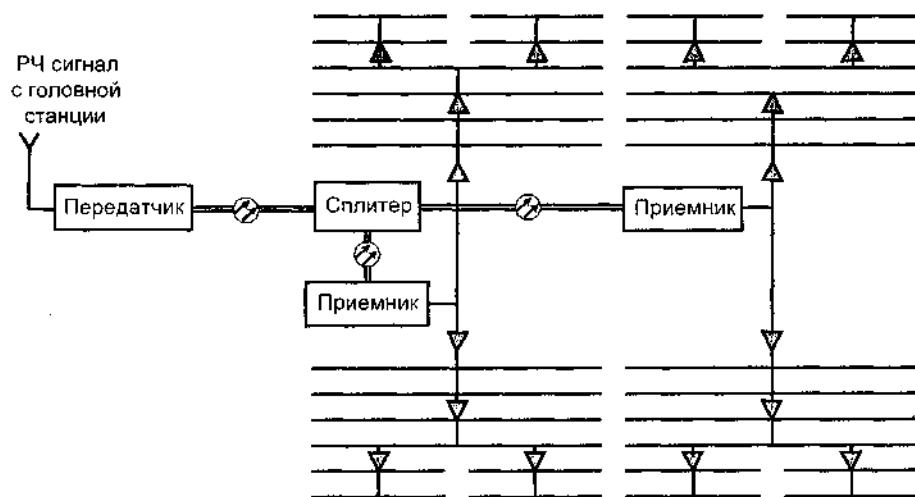


Рис. 18.3. Обслуживание двух сегментов одним волокном

18.2. Проектирование гибридной системы передачи

Гибридная система подобно любой системе передачи может быть логически разделена на компоненты (оптоволоконную часть и коаксиальную часть), а показатели качества передачи каждого компонента могут быть определены в отдельности. Показатели любой составной системы определяются комбинированием показателей ее отдельных компонентов.

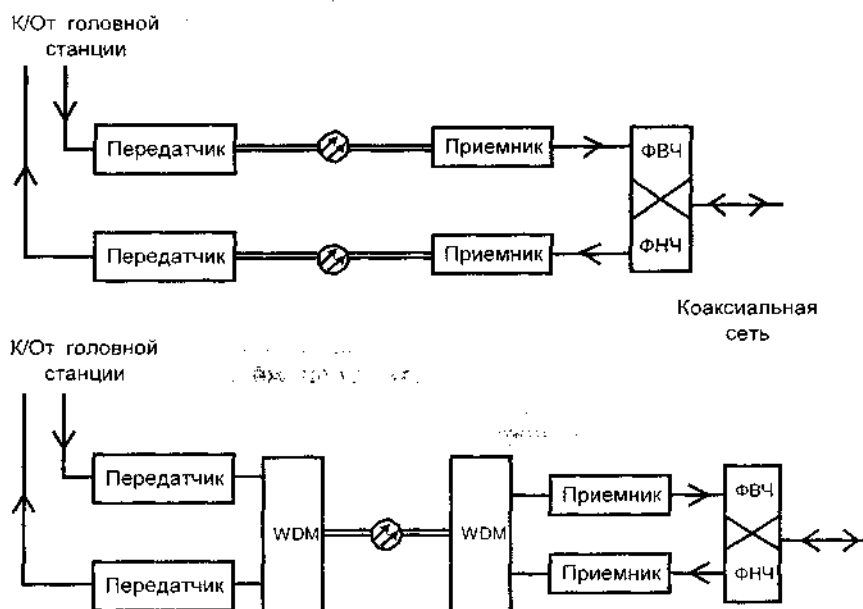


Рис. 18.4. Варианты двунаправленной оптической системы

Расчет может быть осложнен, если рассматривать систему, переносящую одновременно и цифровые и аналоговые сигналы большого количества служб. Хотя такие системы пока распространены не широко, требования к ним должны быть заложены в проект, если это предусматривается в дальнейшем развитии системы. Чтобы выполнить расчет методом комбинирования, необходимо преобразовать показатели статистического характера, применяемые в цифровой передаче (BER), в общепринятые для аналоговой системы единицы (C/N).

Выделив коаксиальные и оптические компоненты гибридной системы передачи, можно определить показатели качества передачи каждого из них, а затем найти показатели гибридной системы путем комбинирования. Для расчета показателей оптической части гибридной системы необходимо рассмотреть те элементы системы, которые находятся между оптическим передатчиком и оптическим приемником и убедиться в том, что уровень сигнала на входе оптического приемника не ниже установленного в спецификации производителем. При выполнении этого условия и необходимом уровне сигнала на выходе оптического передатчика получим качество передачи в оптическом звене, гарантированное производителем оборудования. К факторам, учитываемым в расчетах, относятся допустимые вносимые потери оптической мощности между передатчиком и приемником, которые полностью определяются потерями в волокне, в оптических делителях или ответвителях (если они есть) и потерь на соединениях волокон при их прокладке. Что касается потерь на соединениях, то для них нужно ввести некоторый допуск, чтобы учесть те соединения, которые могут потребоваться при дальнейшем расширении системы или ремонте поврежденных волоконных линий. В точках расположения оптических приемников, от которых питаются коаксиальные распределительные сети, переход от оптических сигналов к радиочастотным электрическим сигналам осуществляется в преобразовании частоты, не требующем демодуляции сигналов аудио/видео и повторной модуляции несущих. Отсутствие промежуточной модуляции упрощает обслуживание и техническую поддержку системы в ходе ее эксплуатации.

Улучшить или получить желаемые показатели гибридной системы, можно меняя параметры отдельных ее элементов. Главным условием при этом является то, что наихудшие показатели в системе для абонентской точки не должны быть ниже допустимых стандартом EN-50083 или ГОСТ Р52023-2003 значений. Реальное качество передачи в системе ограничивается показателями качества отдельных ее элементов. Примером может служить баланс потерь и согласование их с уровнями передачи в оптическом звене, которое необходимо и крайне важно для поддержания заданных показателей качества передачи в оптическом звене. Требуется решить, какими должны быть показатели оптического звена и распределительного коаксиального сегмента гибридной системы, т.е. распределить потери и искажения сигнала по элементам гибридной системы, на основании чего затем определить показатели всей системы.

Приступая к проектированию, прежде всего, необходимо определить, какие методы модуляции и мультиплексирования будут применяться в системе передачи на всех ее уровнях – транспортном, магистральном и распределительном. Зачастую этот выбор не приходится делать разработчику, так как все определяется желанием кабельного оператора, целями, которые он преследует, и экономическим бюджетом проекта. В любом случае этот выбор должен делаться на основе двух факторов – масштаба системы и набора предоставляемых ей услуг. Если система предназначена только для распределения сигналов

Глава 18. Гибридные системы передачи

вещательного телевидения в масштабе небольшого города или городского района, то, вероятно, нецелесообразно будет применять в ней цифровую передачу и создавать оптические магистрали. Если же система задумывается в масштабе большого города, с выходом в глобальные сети и предоставлением мультимедийных услуг, то выбор цифровой технологии передачи с использованием оптоволокна будет обоснован. При строительстве цифровое решение всегда дороже, но и прибыль от его эксплуатации может быть гораздо больше, поэтому перед началом строительства желательно проводить подробные маркетинговые исследования для оценки возможной экономической отдачи.

Затем нужно сегментировать всю область обслуживания системы и установить размеры каждого сегмента исходя из тех соображений, которые были изложены ранее. С точки зрения стандартизации оборудования разумнее выделять в системе сегменты одинаковой емкости. Стандартизация оборудования унифицирует процедуры его настройки и расчета сети, способствует снижению затрат на оптовых поставках и обслуживании оборудования. Установив размер сегмента гибридной системы в количестве абонентских станций, можно определить параметры кабельной структуры, требуемой для обслуживания этого сегмента.

Начать необходимо с выбора подголовной станции адекватной абонентской емкости. Далее следует расчет протяженности создаваемой кабельной структуры через известное значение потерь в оптическом волокне. Так как показатели передачи любого звена уже заранее установлены производителем оптического передатчика и приемника, работающих при определенной нагрузке, требуется только не превышать определенные в спецификации величины выходного уровня передатчика и входного уровня приемника на оптических частотах. С некоторыми отклонениями уровней на протяжении кабельной структуры можно примириться только при условии, что показатели качества передачи всего звена в целом гарантированно будут соответствовать допустимым величинам.

Важным этапом в проектировании любой системы является предварительная оценка необходимого количества оборудования. Количество узловых станций в гибридной системе определяется по количеству сегментов в области обслуживания. Количество оптических передатчиков на одном узле, оптических приемников в магистрали и усилителей в коаксиальной части системы оценить сложнее. Здесь нужно исходить из характеристик городской застройки в области обслуживания в пределах сегмента. Конечно, это очень непросто, особенно в районах, где застройка разнородна, поэтому следует выбрать какой тип жилых зданий, который преобладает в данном районе. Задача несколько упрощается для новых городов и городских районов, в которых массовое строительство велось на основе типовых проектов. Например, на основе исследования района можно принять, что основной тип застройки составляют 9-этажные здания с четырьмя квартирами на этаже и 6 подъездами. Нетрудно подсчитать, что общее количество квартир в таком доме составляет 216. Допустив, что процент проникновения составит по крайней мере 60%, можно определить, что в одном доме потребуется подключить около 130 абонентов. Такое количество абонентов может обслуживаться одним магистральным оптическим приемником, одним магистральным усилителем и тремя домовыми усилителями. Выходной электрический сигнал оптического приемника, как правило, имеет мощность, достаточную для подключения двух или даже трех таких зданий. Если

- типы зданий слишком различаются, довольно грубо оценить количество оборудования можно путем усреднения.

18.3. Расчет оптической части

Использование последних технологий передачи светового сигнала по линии связи с приемлемым качеством создает благоприятные условия для стремительного развития кабельных сетей и практически решает проблему роста требований к современным информационным системам. Прежде всего, естественным образом решается вопрос расширения полосы передачи, существенно ограниченной в коаксиальных системах. Во-вторых, отпадает необходимость в каскадах из множества усилителей, требующих к тому же и установки блоков питания. Вместо этого в линии устанавливается только два активных прибора – оптический передатчик и оптический приемник. На тех расстояниях, которые обычно встречаются в сетях кабельного телевидения, оптический сигнал можно передавать без промежуточных усилений, снижающих качество передачи. В волоконных системах используются такие рабочие частоты, на которых посторонние электромагнитные излучения практически не влияют на передаваемый сигнал и на которых может потребоваться лишь небольшое выравнивание уровня сигнала или авторегулировка с целью компенсации влияния температурных изменений окружающей среды. Иначе говоря, волоконно-оптические системы передачи не нуждаются в сложной технической поддержке для обеспечения высокой эффективности передачи.

Однако, и оптические системы имеют ряд недостатков. Среди них очень низкие уровни передачи, не позволяющие использовать сигнал для питания большого числа абонентских ответвителей, без которых невозможно построить распределительную сеть кабельного телевидения. Если же попытаться доставить оптический сигнал к каждой абонентской установке, то следует обеспечить в каждой такой точке преобразование оптического сигнала в высокочастотный электрический сигнал, поскольку конечным обслуживаемым прибором абонентской сети является телевизор. Высокая стоимость такого решения распределяется между множеством абонентских установок.

В случае передачи сигнала по волоконно-оптическим звеньям участие активных, вносящих шум и искажения, приборов существенно ограничено. В оптимальном варианте это всего лишь один оптический передатчик, один оптический приемник и от 2 до 4 радиочастотных усилителей в каскаде. Все абоненты этой системы, независимо от их удаленности от головной станции, будут принимать сигналы одного и того же качества или очень близкого. Разумеется, это справедливо при условии, что длина волокна между передатчиком и приемником не превышает предельной допустимой величины для данной полосы частот и данной длины волны. Цифровая оптическая система обеспечивает еще более постоянное и предсказуемое качество сигнала в любой обслуживаемой точке. Цифровая сеть обеспечивает одинаковое качество передачи сигнала независимо от протяженности и все последующие коаксиальные сегменты получают сигнал одинаково высокого качества. Поскольку промежуточных усилителей в волоконной линии нет, а искажения, вносимые оптическим передатчиком и оптическим приемником минимальны, то факторами, от которых зависит качество передачи на любом участке (секции) оптической линии являются, во-первых, соотношение физической длины этой секции и рабочей полосы частот,

Глава 18. Гибридные системы передачи

а, во-вторых, показатели качества, определенные в спецификации оптического приемника и передатчика при переносе определенного количества сигналов. Оптические приемники имеют некоторый динамический диапазон входного уровня, в пределах которого они могут принимать сигнал, сохраняя приемлемые показатели качества передачи.

Оптические передатчики, как и коаксиальные усилители, характеризуются различными показателями качества передачи при разных нагрузках и на практике часто встречаются ситуации, в которых первоначально спроектированная система передачи нуждается в модернизации. Например, если при действительной нагрузке в 50 каналов через некоторое время звено должно будет передавать, например, 70 каналов, то выбор подходящего оборудования в будущем позволит легко нарастить канальную емкость системы. Можно, слегка понизив выходной уровень передатчика путем его настройки, несколько намеренно завысить показатели качества при первоначальной, более низкой, нагрузке. При увеличении нагрузки тогда потребуется лишь перенастройка передатчика. При таком, казалось бы простом, подходе проектирование оптической части и ее первоначальная настройка несколько усложняется и требует специального расчета. При регулировке, которая будет выполняться впоследствии, к тому же, возрастает вероятность неправильной настройки оборудования из-за некомпетентности персонала или желания компенсировать другие проблемы в звене передачи путем коррекции его характеристик. Даже если эта регулировка оборудования будет выполнена правильно, стандартная процедура проектирования на основе одинаковых уровней передачи может иметь более весомые преимущества в смысле упрощения первоначальной настройки и последующего технического обслуживания сети по сравнению с первоначальным улучшением качества нестандартными методами.

Способ расчета оптической части полностью аналогичен тому, что применялся при проектировании коаксиальной системы. Уровни оптической передачи выражаются в децибел-милливаттах, а потери, как всегда, в децибелах. Предположим, что имеется ряд передатчиков, каждый из которых удовлетворяет спецификации при одной и той же канальной нагрузке, но все эти передатчики имеют различные выходные мощности. Также предположим, что каждый из этих передатчиков обеспечивает допустимые показатели качества передачи, находящиеся в пределах спецификации звена, а каждое звено предоставляет сигнал на входе оптического приемника с одним и тем же уровнем. С целью устранения проблем совместимости оборудования выбираем передатчики и приемники одного производителя. Необходимо тщательно изучить спецификации оборудования и правильно понимать физический смысл заданных величин. В некоторых случаях производители могут давать в спецификации величину канальной нагрузки исходя из того, что часть каналов передается в цифровом виде, а часть – в аналоговом. При этом для цифровых каналов может быть определен более низкий входной уровень.

При проектировании оптической линии рекомендуется следующий порядок. Сперва определяются при данных расстояниях, потери в звене между его двумя конечными точками на выбранной длине волны. Так как волоконные соединения вносят свои дополнительные потери, необходимо строго оценить количество соединений, которое потребуется. Самый практичный подход состоит в том, чтобы заложить в расчет значение потерь на соединениях с таким технологическим запасом, который адекватен потерям, вносимым установкой лю-

бого разумного числа соединений. Зная уровень оптического сигнала на входе волокна, который был установлен выходной спецификацией производителя передатчика, уровень на входе оптического приемника легко найти путем сложения всех потерь в звене и вычитания этой величины из выходного уровня передатчика. Если этот уровень соответствует или близок установленному в спецификации приемника входному уровню, то качество передачи в звене будет соответствовать требуемому. Конечно, нужно рассматривать проблему оптических соединений и ответвлений при использовании для обслуживания более, чем одного сегмента (более одного оптического приемника). Деление оптической мощности между двумя или большим количеством распределительных волокон создает потери в каждом волокне, которые должны быть прибавлены при расчете уровня на входе каждого оптического приемника, обслуживаемого этим волокном.

В качестве терминального оборудования оптической линии связи, как правило, выбирается оптический передатчик и оптический приемник одного производителя. Оптический передатчик предназначен для формирования полосы передачи требуемой ширины и генерирования в этой полосе выходного сигнала с фиксированным диапазоном уровней на данной несущей частоте оптического диапазона для передачи определенного числа сигналов через оптическое волокно. Оптический приемник предназначен для предоставления переданного сигнала с требуемым качеством при заданном входном уровне. Все оптические передатчики характеризуются разными выходными мощностями, и чем выше выходная мощность прибора, тем больше его стоимость. Как правило, производители предлагают передатчики с рядом различных выходных мощностей. Используя передатчики с различными выходными мощностями в сочетании с одним и тем же оптическим приемником на одной частоте оптического диапазона, получим, что одно и то же качество передачи можно будет обеспечить на участках разных длин. Т.е. допустимые потери сигналов разного уровня в системах различной протяженности будут различаться.

Следующим шагом может быть распределение потерь сигнала в оптической линии. Определяя выходной уровень передатчика, можно распределить потери в системе по участкам различных длин. С точки зрения материально-технического обеспечения это означает, что в большой системе требуется установить некоторое число различных передатчиков, а также резервные блоки к ним в том же количестве, если резервирование необходимо. Можно пойти и другим путем, используя только одинаковые передатчики с максимальной выходной мощностью на всех участках. В этом случае будем подстраивать величины потерь во всех оптических звеньях с помощью оптических аттенюаторов, устанавливаемых на входах оптических приемников, чтобы все потери были приблизительно равны. В таком случае все звенья будут иметь одинаковые или очень близкие показатели качества передачи, а с точки зрения логистики получим упрощение системы, хотя и с некоторым превышением ее стоимости. Вероятно, разумнее всего избрать промежуточный вариант, когда разнообразие передатчиков можно будет уменьшить, прибегнув к малому числу аттенюаторов в некоторых звеньях. В некоторых случаях представляется возможным платить более высокую цену за прокладывание наиболее длинных звеньев из волокна с очень низкими потерями. Также можно снизить потери в волокне за счет выбора другой рабочей длины волны оптического диапазона, на которой затухание сигнала на единицу длины волокна ниже, но такой подход менее ве-

Глава 18. Гибридные системы передачи

роятен. Архитектуру системы, конечно, тоже можно изменить. Если первоначально было запланировано подавать сигнал от одного передатчика, скажем, на два приемника при помощи оптического делителя, то впоследствии можно внести изменения в проект системы, устранив этот делитель и связанные с ним потери, и подав питание на каждый приемник по отдельному волокну. Такое решение не всегда будет более экономичным и желательным, но оно может облегчить проектирование очень больших участков.

Теперь остается только рассчитать полные потери передачи во всей соединительной кабельной структуре и убедиться в том, что уровни входных сигналов оптических приемников и гарантируемые ими показатели качества полностью соответствуют допустимым величинам. Эти результирующие потери включают потери в волокне, потери на соединениях вместе с допусками на возможные соединения в будущем и потери на всех оптических пассивных и активных устройствах, включаемых в соединительное волокно. Расчеты, выполняемые на этом этапе, обычно называются балансом потерь в оптическом звене. Они могут учитывать некоторые допуски на возможные ошибки или будущие соединения, которые могут потребоваться при восстановлении поврежденных волокон. Необходимо помнить, что оптические приемники относительно слабо чувствительны к малым отклонениям уровня входного сигнала вследствие величины их собственного динамического диапазона.

Такая процедура расчета позволяет установить показатели качества передачи любого оптического звена с приемлемой точностью. Однако, необходимо не только вычислить показатели, но также измерить их и проверить достигаются ли расчетные значения в действительности. Для контроля соответствия расчетных показателей реальным в системе производится первоначальная настройка и выполняются измерения в тестовых точках компонентов системы между входом и выходом оптического звена. Измерение показателей системы должно выполняться регулярно в ходе технического обслуживания, целью которого является поддержание показателей постоянными при длительной эксплуатации системы.

Оценим необходимое количество оборудования в оптической части гибридной сети. Допустим, что в предполагаемой области обслуживания системы КТВ число потенциальных абонентов составляет 100 тысяч, а один сегмент в среднем содержит 20 тысяч абонентов. Число узловых (подголовных) станций в такой системе равно 5. Магистральный уровень частично выполнен на оптике. Требуется оценить необходимое количество коаксиального и оптического оборудования в сегменте и во всей гибридной системе. Оценка выполняется в предположении, что число потенциальных абонентов сети и количество абонентов, которых способно обслуживать одно устройство (усилитель, приемник или передатчик), заранее известно. Допустим, что количество абонентов в коаксиальной распределительной (домовой) сети, подключаемых к одному выходу магистрального оптического приемника, равно 400. Тогда необходимое количество магистральных оптических приемников в сегменте будет равно:

$$N_{\text{пр}} = 20000/400 = 50.$$

Если предположить, что каждая оптическая магистраль обслуживает 5 оптических приемников, т.е. на один передатчик приходится в среднем 5 приемников, то количество передатчиков в сегменте (установленных на одной узловой станции) составит:

$$N_{\text{пер}} = 50/5 = 10.$$

Таким образом, во всей системе, включающей 5 таких сегментов, потребуется установить около 250 оптических приемников и 50 оптических передатчиков. Далее приведем простейшие примеры баланса потерь в оптической части.

Пример 1.

В оптическом звене длиной 6 км установлен делитель для обслуживания двух приемников. Требуется определить выходной уровень передатчика.

Для расчета будем использовать следующие значения:

- потери в волокне 0,4 дБ/км;
- потери в разъемах 0,5 дБ/разъем (в каждом звене 2 разъема);
- потери в соединениях 0,2 дБ/км (включая допуски на восстановление);
- потери в делителях 3,0 дБ;
- входной уровень приемника –3,0 дБ-м (при номинальном динамическом диапазоне);
- максимальный выходной уровень передатчика +8,0 дБ-м.

Получим следующие значения потерь, дБ:

В волокне	2,4
В разъемах.....	1,0
В соединениях	1,2
В делителе	3,0
Общие потери в звене.....	7,6

Если входной уровень приемника должен быть равен –3,0 дБ-м, а общие потери в звене составляют 7,6 дБ, то выходной уровень передатчика должен составлять +4,6 дБ. Поскольку входной уровень приемника фиксирован, то единственным фактором, которым можем манипулировать, является выходной уровень передатчика. Поскольку используем делитель, потери сигнала на обоих его выходах равны, но если предположить, что приемники находятся на различных расстояниях от делителя, то необходимые длины волокна, а, значит, и потери в волокнах будут для двух приемников неодинаковы. Кроме того, в одной из точек расположения приемника могут быть внесены дополнительные потери от соединений. В результате в конечных точках двух оптических звеньев приемники будут получать сигналы с разными входными уровнями. Несомненно, выходной уровень единственного передатчика нельзя изменить так, чтобы выполнить требования спецификаций обоих приемников. Для выхода из этой ситуации придется либо устанавливать на одном из выходов делителя оптический аттенюатор, либо уменьшать длину другого волокна. Если же разность потерь в волокнах не превышает динамический диапазон самих приемников, то не понадобится никаких действий для выравнивания уровней. С другой стороны, если разности длин волокон и потерь в них очень велики, то скорее вместо делителя следует использовать оптический ответвитель.

Пример 2.

С помощью одного волокна оптический приемник обслуживается одним оптическим передатчиком. Требуется найти наибольшее расстояние, на которое приемник может быть удален от передатчика. Значения потерь и уровней берутся из предыдущего примера.

Поскольку необходимо найти наибольшее расстояние между приемником и передатчиком, следует установить максимальный выходной уровень передатчика (+8 дБ-м). В соединительном волокне потребуется по крайней мере два

Глава 18. Гибридные системы передачи

оптических разъема, которые вносят потери $2 \times 0,5 = 1,0$ дБ (эти потери не зависят от расстояния), поэтому уровень сигнала становится равным 7 дБ·м. Если при этом входной уровень приемника должен быть равен -3 дБ·м, то общие потери в волокне составят 10 дБ. Общие потери в оптическом звене складываются из собственно потерь в волокне (0,4 дБ/км) и потерь на соединениях (0,2 дБ/км). В сумме они составляют 0,6 дБ/км. Разделив найденные потери 10 дБ на 0,6 дБ/км, получим, что допустимое расстояние до приемника составляет 16,6 км. На этом расстоянии при данных уровнях сигнала и потерях передатчик и приемник будут обеспечивать то качество передачи в звене, которое было определено производителем для данного оборудования.

18.4. Расчет коаксиальной части

Широкополосные коаксиальные системы строятся исключительно на основе коаксиального кабеля и переносят сигналы, в основном телевизионные, как правило, в аналоговом виде с частотным разделением и мультиплексированием. Обычно полоса порядка 800 МГц используется для одновременной передачи примерно 50 или даже более телевизионных каналов. Кроме собственно телевизионных сигналов в системе могут передаваться сигналы телетекста, различных служб передачи данных (в цифровом виде), сигнализации. Широкополосная коаксиальная технология, которая остается пока основной технологией кабельных сетей, имеет множество недостатков. Потери передачи в коаксиальном кабеле таковы, что необходимо частое усиление сигнала, а это требует значительного количества радиочастотных широкополосных усилителей, включенных последовательно в каскад. Каскады из нескольких десятков усилителей не являются чем-то необычным в коаксиальной системе. Поскольку эти приборы являются аналоговыми, то шумы и интермодуляционные искажения, производимые каждым из них, накапливаются в окончании передающей системы и ухудшают качество передачи. Кроме этого, поскольку каждый такой прибор является активным, необходима подача питания к множеству точек на протяжении всей системы. Каскад из множества усилителей с учетом сложной системы их питания в значительной степени подвержен сбоям, означаящим прерывание обслуживания. Если требуется увеличить число передаваемых телевизионных сигналов, то следует расширить полосу системы передачи, но при этом практическая эффективность работы каскада из большого количества усилителей становится еще более проблематичной.

Экономичность каскадной структуры определяется относительно уровней передачи и коэффициентов усиления усилителей в ней. Нужно понимать, что любые меры, направленные на повышение экономичности системы, неизбежно ведут к более сильным искажениям и шумам. Коаксиальная сеть подвержена электромагнитному влиянию различных посторонних сигналов по входу и выходу, фоновым помехам от сети питания и т. д. Помимо этого, сильное различие в потерях передачи на высоких и низких частотах, чувствительность к температурным изменениям, необходимость выравнивания частотной характеристики кабеля и другие проблемы, имеющие место в таких системах, ведут к усложнению процедур их тестирования и технического обслуживания. Может показаться, что эта технология достигла предела своего развития, никакие дальнейшие ее усовершенствования невозможны и для повышения качества передачи необходимо создавать новые технологии, базирующиеся на других прин-

ципах. Отчасти это так, но, тем не менее, ресурсы коаксиальной технологии не исчерпаны полностью и в некоторых случаях она предоставляет практичное и экономически выгодное решение, как, например, при необходимости обслуживания множества абонентов, расположенных в случайном порядке. На сегодняшний день эта технология, позволяющая легко разворачивать кабельную сеть почти в любых условиях, остается очень привлекательной для операторов кабельного телевидения.

Методика расчета коаксиальной сети основана на определении таких показателей качества передачи как C/N, CTB, CSO и CXM при выбранных уровнях передачи, которые зависят от канальной нагрузки сети и возможностей усилительного оборудования. Возможно и даже наиболее вероятно, что радиочастотные усилители, используемые в коаксиальных сегментах гибридной системы, будут иметь большее усиление, чем линейные усилители в полностью коаксиальной системе. Это объясняется тем, что в гибридной системе длина каскада усилителей строго ограничена и дополнительные искажения, создаваемые усилителями с высоким выходным уровнем, могут быть вполне допустимы в комбинации с низкими искажениями и шумами, создаваемыми самим оптическим звеном. Конечно, если уровни сигналов в коаксиальной структуре более высокие, то стоимость такой структуры повышается. Если разработчик хочет создать систему гибридной конфигурации с более высокими качественными показателями, то наиболее целесообразным и желательным это улучшение будет в распределительном сегменте системы передачи. Заметим, что в отличие от обычных полностью коаксиальных систем гибридные системы предоставляют сигнал всем абонентам почти с одним и тем же качеством и уровнем, независимо от удаленности конкретного абонента от головной станции. При этом число коаксиальных радиочастотных усилителей, через которые проходит сигнал на пути к абоненту, будет различным. При создании большой гибридной системы, вероятно, потребуется построить множество коаксиальных распределительных систем, совокупная стоимость которых будет довольно значимым фактором при проектировании.

В коаксиальной системе, напомним, для передачи сигнала применяется частотное мультиплексирование. От количества используемых радиочастотных усилителей зависят уровни передачи на каждом усилителе и показатели передачи в оконечной точке системы. Для каждого отдельного проекта площадь покрытия или протяженность сети индивидуальна. В результате расчета показателей передачи всей системы получаем, что либо на всех усилительных участках показатели соответствуют запланированным, либо в части системы показатели лучше запланированных. При этом все участки соответствуют спецификациям, но более короткие участки имеют лучшие характеристики, чем более длинные. Это относится и к уровням радиочастотных сигналов, подаваемых в абонентские точки. Уровни должны быть примерно одинаковы или, по крайней мере, находиться в допустимых пределах, но в действительности все абоненты принимают сигнал с разным качеством, т.е. с разными показателями сигнал/шум и интермодуляции. Соблюдение спецификаций означает только, что все абоненты принимают сигнал с качеством, которое не ниже нормативного.

Свойства коаксиальной распределительной сети до некоторой степени диктуются географическими свойствами обслуживаемой области при условии, что необходимо обслужить всех абонентов в пределах данного сегмента. Такие обстоятельства как наличие рек, озер или возвышенностей могут сыграть свою

Глава 18. Гибридные системы передачи

роль. Несомненно, правильнее будет сразу определить показатели передачи любого каскада радиочастотных усилителей, как было показано в предыдущих главах. Если все оптические звенья в гибридной системе характеризуются одним и тем же качеством передачи независимо от их длины и все коаксиальные сегменты действуют построены по одной схеме, то можно значительно упростить расчет гибридной системы. Если все коаксиальные распределительные звенья имеют, скажем, по 4 усилителя, которые работают при одинаковых входных и одинаковых выходных уровнях, то все распределительные коаксиальные расширения будут предоставлять сигнал одного и того же качества. Тогда в результате комбинирования одинаковых показателей оптического и коаксиального звеньев гибридной системы получим, что все ее сегменты обеспечивают одно и то же качество сигнала на выходе самого удаленного усилителя.

Качество сигнала, подаваемого на каждую коаксиальную распределительную структуру, является достаточно высоким по сравнению с качеством сигнала, подаваемого в фидерный кабель после, скажем, 20 транковых усилителей в чисто коаксиальной системе. Поэтому в гибридной системе разработчик имеет большую свободу в выборе длины каскада. Вероятно, в большинстве случаев влияние шума и искажений от трех или четырех усилителей в коаксиальном каскаде допустимо при условии уменьшения выходных уровней, как это делалось в полностью коаксиальных системах. Рекомендовать конкретные длины каскадов в коаксиальной части гибридных систем не представляется возможным, поскольку это зависит от технических условий, в которых принимается решение в каждом отдельном случае. Длина усилительного каскада будет определяться в значительной степени размером сегмента, который также выбирается разным в разных проектах. Поскольку в оптической системе имеем более широкую полосу передачи и предполагаем устанавливать абонентские ответвители во всех коаксиальных расширениях, то в коаксиальных сегментах гибридных систем можно обеспечить уверенное выравнивание спектра сигналов. Пассивные эквалайзеры, расположенные в линии последовательно выравнивают сигналы в абонентских ответвлениях. Они могут использоваться более часто, чем в полностью коаксиальных системах с ограниченной полосой передачи. Процесс выбора ответвителей при распределении сигнала изменяющегося уровня вдоль отрезка коаксиального кабеля, когда на все абонентские ответвления необходимо подать сигналы равных или очень близких уровней, является неизменным как для полностью коаксиальной, так и для гибридной системы.

Важным условием равного качества сигнала в сегментах является то, имеют ли все коаксиальные расширения одинаковое число усилителей в каскаде. Как было установлено ранее, усилительные каскады коаксиальных сетей делятся на транковые и фидерные. Опыт строительства сетей и инженерные расчеты позволяют определить, что фидерные участки умеренно ухудшают качество сигнала в транке, а современный уровень развития систем связи диктует необходимость двух линейных усилителей в качестве стандартной длины фидерного каскада. Длина каскада транковых усилителей является неопределенной и зависящей от действительного расстояния до последнего фидера, поэтому качество сигнала в окончании транка, характеризующееся вносимыми в него шумами и искажениями, также зависит от конкретных условий проекта. Техническая поддержка системы упрощается, поскольку все фидеры или их большинство имеет одинаковые усилительные каскады, а все усилители работают при оди-

18.4. Расчет коаксиальной части

наковых входных и одинаковых выходных уровнях. С нестандартными требованиями к фидерному каскаду, когда в нем необходимо 3 или 4 усилителя, можно столкнуться как с исключением из правила. Если такое расширение фидера необходимо, то для ограничения искажений используется самый простой прием, т.е. снижение полезного усиления каскада и, следовательно, его выходных уровней, что приводит к уменьшению интермодуляции. Этот прием вводит нестандартные уровни сигнала на некоторых участках системы, что в действительности усложняет ее техническое обслуживание, но, тем не менее, этот подход очень удобен и широко распространен. В случае коаксиального распределительного сегмента гибридной системы можно применять ту же методику.

Оценим приблизительно необходимое количество домовых и магистральных усилителей в коаксиальной части распределительного сегмента с емкостью 20 тысяч абонентов. В условиях типичной городской застройки один домовый усилитель может обслуживать максимум 50 абонентов. Следовательно, минимальное необходимое количество домовых усилителей в сегменте составит:

$$N_d = 20000/50 = 400.$$

Количество магистральных усилителей будет определяться планируемой протяженностью коаксиальной части магистрали. Допустим, протяженность коаксиальной магистрали такова, что между оптическим магистральным приемником и домовым усилителем требуется установить только два магистральных усилителя, т.е. на каждый оптический приемник приходится два магистральных усилителя. Если в сегменте установлено 50 приемников, то количество магистральных усилителей в сегменте составит:

$$N_m = 100.$$

Принимая во внимание тип застройки, можно оценить и количество магистральных и абонентских пассивных распределительных элементов в сегменте. Максимальное количество магистральных распределительных устройств, очевидно, равно числу домовых сетей. Количество абонентских устройств зависит от числа абонентов, обслуживаемых с одного ответвителя. Как правило, это число не более четырех, следовательно минимальное количество абонентских пассивных будет равно:

$$N_n = 20000/4 = 5000.$$

Таким образом, во всей системе, включающей 5 таких сегментов, потребуется установить около 2000 домовых усилителей, 500 магистральных усилителей и 25000 абонентских распределительных устройств. В зависимости от типа застройки эти оценки могут меняться.

18.5. Интерактивные системы передачи

Возможности, предоставляемые системой КТВ в плане обслуживания абонентов, серьезно расширяются при введении двунаправленной передачи. Технология двунаправленной передачи, называемая также технологией передачи с обратным каналом, была разработана специально для систем КТВ. Дополнительные затраты на поддержку двунаправленной передачи в кабельной системе передачи вполне оправданы, если оператор системы хочет как можно более

Глава 18. Гибридные системы передачи

полно использовать потенциал создаваемой системы. В настоящее время разные производители предоставляют широкий спектр оборудования, предназначенного как для создания изначально двунаправленных систем КТВ, так и для последующей модернизации ранее построенных однонаправленных систем. Двунаправленное оборудование с полосой обратного канала 5 – 30(65) МГц сейчас фактически является стандартом при разработке современных систем КТВ. Все оборудование двунаправленных систем должно поддерживать передачу сигнала в обоих диапазонах полосы с требуемым качеством.

В основе технологии двунаправленной передачи лежит частотное разделение спектра (см. рис. 3.12, гл. 3). По одному кабелю одновременно передаются сигналы прямого и обратного каналов в полосе 5 – 1000 МГц. Диапазон частот 5 – 30 МГц отведен для передачи сигналов обратного канала, диапазон 47 – 1000 МГц отведен для передачи сигналов прямого канала. Диапазон 30 – 47 МГц не используется для передачи сигналов, а обеспечивает развязку сигналов прямого и обратного каналов.

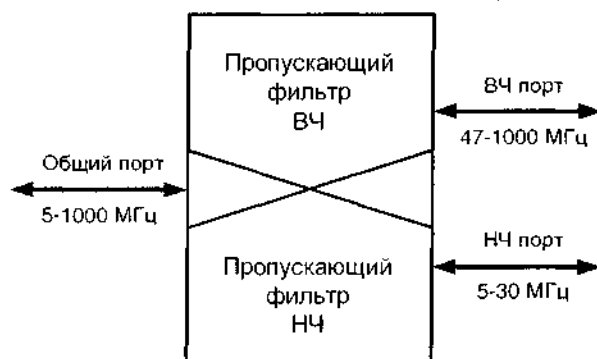


Рис. 18.5. Двунаправленный фильтр

Разделение спектров прямой и обратной передачи осуществляется с помощью двунаправленных фильтров, которые входят в состав оборудования головной станции и каждого усилителя в распределительной сети. На рис. 18.5 показан двунаправленный фильтр, используемый в сетях с обратным каналом. Он состоит из двух полосовых фильтров – низкочастотного, пропускающего только сигналы частот 5 – 30 МГц, и высокочастотного, пропускающего только сигналы частот 47 – 1000 МГц.

Частотные характеристики обоих пропускающих фильтров определяют ширину диапазонов, доступных для передачи прямого и обратного потоков, а также обеспечивают необходимую развязку этих диапазонов для устранения взаимного влияния между ними. Сигналы обоих направлений передачи должны беспрепятственно проходить через двунаправленный фильтр. На общем порте фильтра, к которому подключается коаксиальный кабель, присутствует весь спектр передачи (5 – 1000 МГц). Низкочастотный сигнал, подаваемый на общий порт, будет подавлен на выходе высокочастотного порта, и наоборот, высокочастотный сигнал, подаваемый на общий порт, будет подавляться на низкочастотном порте. Другими словами, высокочастотный сигнал будет свободно проходить через фильтр в обоих направлениях, но только между общим и высокочастотным портами. Низкочастотный сигнал также будет свободно проходить

через фильтр в обоих направлениях, но только между общим и низкочастотным портами.

Структурные схемы двунаправленных усилителей были описаны в гл. 10 (усилительное оборудование коаксиальных систем). Разделительные фильтры устанавливаются на входе и выходе усилителей. Внутри усилителя сигналы прямого и обратного каналов разделяются физически и обеспечивается совершенно независимое их усиление.

Для организации обратной передачи в магистрали вполне могут использоваться и оптические линии передачи. Для обратного канала либо выделяется отдельное волокно, либо применяется технология волнового мультиплексирования с передачей прямого и обратного каналов на разных длинах волн.

Главной функциональной возможностью, которой обладают двунаправленные системы передачи, является их интерактивность, т.е. возможность взаимодействия абонентской станции, где бы в системе она ни находилась, с головной станцией в режиме двустороннего обмена информацией. Это, конечно, требует организации обратного канала, но кроме этого существует еще проблема организации доступа абонентов к головной станции. Обратный поток информации от множества абонентских терминалов к головной станции можно организовать с помощью разных режимов. Различие этих режимов состоит в способе распределения времени обратной передачи между абонентами и в способе обработки обратных сигналов на головной станции.

Первый способ обеспечивает постоянно поддерживаемую, доступную по требованию возможность приема-передачи для каждой абонентской станции в режиме реального времени. Лучшим примером взаимодействия такого типа служит обычная коммутируемая телефонная сеть. В любое время, когда бы ни пожелал абонент снять телефонную трубку, он гарантированно и немедленно получает доступ к головному коммутационному центру. После выбора любой из многих тысяч индивидуальных абонентских станций путем набора номера головная станция устанавливает путь передачи между двумя станциями. Передача осуществляется через головную станцию и является двунаправленной и непрерывной, т.е., оба абонента могут говорить одновременно. Эта служба доступна и работоспособна независимо от того, пользуется ли ею кто-нибудь еще на протяжении этого кабельного маршрута. Взаимодействие в таком режиме может быть организовано путем выделения каждому абоненту своей полосы частот в спектре обратной передачи. Следовательно, все абоненты в системе могут одновременно получить доступ к головной станции и эта возможность теоретически ограничена только способностью головной станции обрабатывать поступающие сигналы. Однако, при большом количестве абонентов реализовать этот режим практически невозможно.

Для некоторых примитивных интерактивных служб возможность взаимодействия в режиме реального времени не требуется, поэтому может использоваться второй способ организации обратного доступа, на основе деления времени между абонентами путем опроса всех абонентов. Например, в системах сигнализации вполне допустима задержка передачи сообщения о тревоге на несколько секунд. Это в равной степени относится и к системам считывания показаний датчиков, сообщения об оплате телевизионных программ и другим подобным службам. Поддержка режима опроса позволяет упростить работу всей системы. В этом режиме система в каждый данный момент времени обращается только к одной определенной абонентской станции. Это осуществля-

Глава 18. Гибридные системы передачи

ется путем передачи в сеть уникальной цифровой последовательности импульсов, кодирующих индивидуальный адрес определенной станции, и, хотя все станции в сети в действительности могут принимать эту последовательность, декодирует ее только та единственная станция, к которой обращается система. Раз система может обращаться в любой момент времени только к одной станции, следовательно, в данный момент только этой станции разрешается отвечать на запрос или передавать информацию. Этот режим передачи, тоже обеспечивающий интерактивность (хотя и неполноценную), можно рассматривать как режим с раздельным использованием линии, где в каждый момент времени только один абонент может пользоваться передающей средой.

Современные цифровые технологии позволяют делать опрос нескольких тысяч станций в минуту. Поскольку формат опрашиваемого сигнала одинаков для всех станций, требуется только одна несущая частота для всего прямого направления системы передачи, на которой все станции принимают эти сигналы. В тот момент, когда какая-либо одна станция осуществляет обратную передачу информации в направлении головной станции, остальные станции, настроенные на ту же частоту, молчат.

Каждая абонентская станция должна быть снабжена устройством памяти и микропроцессором для отсчета строго определенных периодов времени, в течение которых эта станция имеет право на передачу информации. Внутреннее устройство памяти абонентской станции служит для записи информации и данных об изменениях ее статуса до тех пор, пока центральная станция не отправит запрос на эту станцию, означающий разрешение на передачу. В момент прихода запроса терминальная станция начинает передачу своей сохраненной информации на центральную станцию в течение отведенного ей промежутка времени.

Второй способ поддержки интерактивной способности сети неприемлем для многих служб, требующих взаимодействия в режиме реального времени. Прежде всего это относится к мультимедийным службам, включающим потоки аудио и видео информации. Поэтому широко используется третий вариант обратного доступа, называемый произвольным доступом с контролем несущей и обнаружением коллизий, который сочетает в себе преимущества первых двух способов. Подробнее об этом режиме доступа будет сказано в главе, посвященной передаче данных по сети КТВ. Он позволяет обеспечить доступ большого числа абонентов к головной станции, позволяя при этом добиться практически полноценной интерактивности.

Интерактивные адресуемые терминалы открыли совершенно новую перспективу, но вместе с этим и усложнили задачу разработчика сети. Большинство обратных сигналов не содержит видеoinформации, а несет информацию, управляющую передачей потока, например, ограничивая или представляя возможность выбора передаваемой информации. Применение для проектирования критериев и показателей, ориентированных на передачу телевизионных сигналов, в этом случае оказывается неприемлемым. Эти критерии во многом зависят от характера того информационного потока, который предполагается передавать по обратному каналу, от метода передачи и модуляции (цифрового или аналогового), от битовых скоростей потоков данных или занимаемой полосы частот. Возможный состав служб, интегрируемых в современные системы КТВ практически определен, поэтому разработчик при проектировании обратного канала может ориентироваться на их характеристики.

Практически все факторы, учитываемые при проектировании прямого направления передачи, также действительны для обратного направления. Например, сигнал обратного канала нуждается в периодическом усилении из-за потерь передачи в кабеле и других приборах системы. Шум и интермодуляция также проявляются здесь. Особенное внимание разработчик должен уделять шуму, так как низкочастотный диапазон, выделенный в кабельной сети для сигналов обратного канала подвержен влиянию множества источников шума. Кроме того, проектирование обратного канала имеет свои особенности, предъявляя к некоторым показателям более жесткие требования.

18.6. Особенности проектирования обратного канала

Хотя вносимый шум и отношение C/N отдельного усилителя находятся одинаково как для оборудования прямой передачи, так и для оборудования с передачей обратного потока, для двунаправленных систем существует очень значительное отличие. В сети прямой передачи общий накопленный сигналом шум является комбинацией вносимых шумов только тех усилителей, через которые в действительности прошел сигнал. Например, если система содержит всего 100 усилителей, но самый протяженный каскад состоит из 15 усилителей, то общий шум в прямом канале будет накоплен каскадом из 15 блоков. Т.е. для определения наихудшего C/N в окончании системы, нужно будет учитывать только эти 15 блоков.

В двунаправленной системе все усилители обратного канала вносят шумы в общую точку приема, где располагается головная станция. На рис. 18.6 изображена часть системы, построенной по принципу транк-фидер, аналогичная той, которая была приведена в предыдущей главе, но здесь все усилители являются двунаправленными, что и показано стрелками обратного направления рядом с каждым усилителем. Заметим, что стрелки направлены к точке начала системы, т.е. к головной станции. Мощность генерируемого каждым усилительным блоком будет накапливаться на головной станции.

Эту ситуацию можно представить себе как наличие в системе множества генераторов шума, каждым из которых является усилитель обратного канала. Все время, даже в отсутствии входных сигналов, усилители обратного канала генерируют шум, а на общем выходе всех усилителей, в точке расположения головной станции системы, шум концентрируется. Очевидно, на головной станции происходит суммирование шума, в результате чего в обратном направлении передачи мощность шума может стать очень значительной. Особенность расчета шума обратного канала системы КТВ состоит в том, что шум следует рассматривать в обратном канале не только как продукт каскада усилителей обратного канала, через которые должен пройти сигнал на своем пути к головной станции, но как продукт всех усилителей обратного направления в системе, независимо от того, где они расположены физически, и проходят ли через них сигналы в действительности. На практике это требует от разработчика завершения проектирования прямого направления передачи перед расчетом показателей обратного направления передачи, поскольку для этого необходимо знать не только характеристики каскада обратных усилителей, через который проходит сигнал, но и общее количество усилителей. При известном количестве усилителей в транковой структуре и фидерной структуре в отдельности можно вычислить показатели CXM и C/N обратного направления, зная рабочие уровни

Глава 18. Гибридные системы передачи

сигналов и комбинируя эти результаты с показателями шума и интермодуляции прямого направления для определения наихудшего качества передачи в оба направления (по петле) во всей системе.

Интермодуляционные искажения в обратном канале рассчитываются проще, поскольку они являются функцией только того количества усилителей, через которые в действительности проходит сигнал. Это объясняется тем, что в отсутствии сигнала никаких искажений в системе не появляется. Поэтому можно вычислить СХМ обратного канала точно тем же способом, как это делали для прямого направления передачи, но обращая должное внимание на выходные уровни сигналов, канальную нагрузку и выходные спецификации усилителя. В результате расчета показателей обратного канала следует установить характеристики каскада, которые бы отражали и вклад шума от тех усилителей, через которые проходит сигнал, и шум, вносимый всеми усилителями обратного направления. Один из возможных подходов основан на определении шума эквивалентного усилительного каскада:

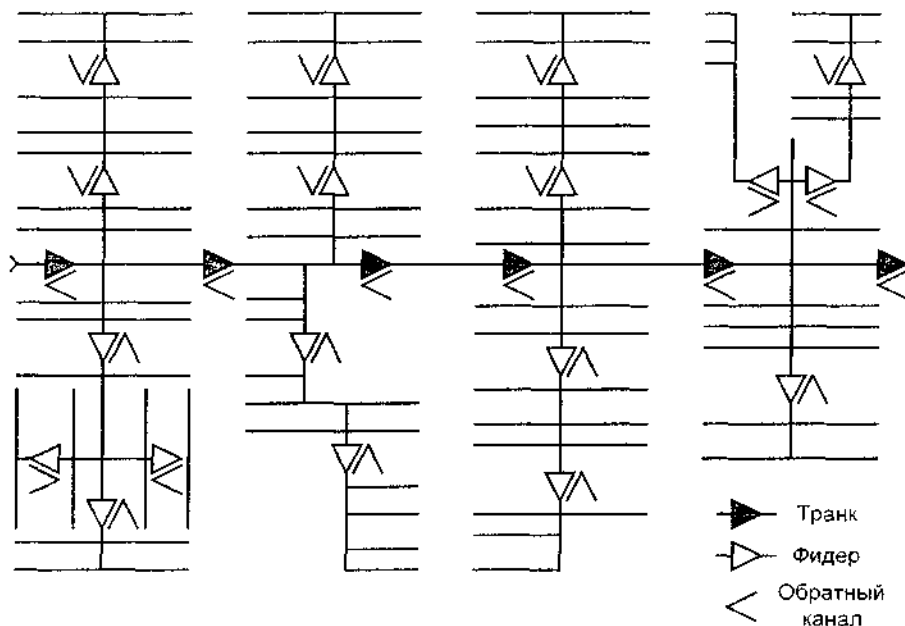


Рис. 18.6. Двухнаправленная система транк-фидер

$$N_{\text{экв}} = \sqrt{n \cdot m},$$

где $N_{\text{экв}}$ – число усилителей в эквивалентном каскаде, n – общее число усилителей в сети, m – число усилителей в самом длинном каскаде. Число m должно соответствовать самому длинному каскаду в системе, так как необходимо ориентироваться на худший случай. При известном коэффициенте шума отдельного обратного усилителя и уровне сигнала на его входе можно определить отношение С/Н этого каскада, которое будет равно отношению С/Н обратного канала в окончании транковой или фидерной системы передачи на головной станции. Найдем отношение С/Н отдельного усилителя с помощью известной формулы:

18.6. Особенности проектирования обратного канала

$$C/N_{yc} = S_{вх} + F,$$

где F – коэффициент шума усилителя; $S_{вх}$ – уровень входного сигнала усилителя.

Каскад из $N_{экив}$ таких усилителей будет создавать шум, определяемый отношением:

$$C/N_{T\Sigma} = C/N_{yc} - 10 \lg N_{экив}.$$

Определяя это отношение C/N для обратного канала транковой системы передачи, можно комбинировать его с аналогичным отношением C/N обратного канала фидерной системы, а затем комбинировать результат с отношением C/N прямого направления передачи, чтобы найти наихудшие в системе показатели передачи по петле, т.е. от конечной точки системы обратно к головной станции, а затем, снова в прямом направлении к той же конечной точке системы.

Чтобы продемонстрировать этот процесс, рассмотрим пример расчета показателей системы транк-фидер в обратном канале и по петле.

Пример

Будем считать, что система имеет следующие характеристики (значения условные):

Общее количество транковых усилителей во всех магистралях сети	100
Количество усилителей в самом протяженном транковом каскаде	15
Общее количество фидерных усилителей во всех сетях	400
Количество усилителей в самом протяженном фидерном каскаде	3
Канальная нагрузка прямого канала	21 канал
Канальная нагрузка обратного канала	4 канала
C/N системы передачи по петле (прямой канал плюс обратный канал)	42 дБ
СХМ системы передачи по петле (прямой канал плюс обратный канал)	52 дБ

Характеристики оборудования:

Транковый усилитель прямого канала

Кроссмодуляция (при выходе +48 дБ·мВ)	57 дБ
Коэффициент шума	10 дБ
Коэффициент усиления	23 дБ

Фидерный усилитель прямого канала

Кроссмодуляция (при выходе +52 дБ·мВ)	57 дБ
Коэффициент шума	10 дБ
Коэффициент усиления	26 дБ

Транковый усилитель обратного канала

Кроссмодуляция (при выходе +50 дБ·мВ)	57 дБ
Коэффициент шума	7 дБ
Коэффициент усиления	20 дБ

Фидерный усилитель обратного канала

Кроссмодуляция (при выходе +50 дБ·мВ)	57 дБ
Коэффициент шума	6 дБ
Коэффициент усиления	23 дБ

Ранее уже обсуждался выбор рабочих уровней сигнала, а здесь для упрощения просто выберем рабочие уровни прямого канала передачи произвольно:

Глава 18. Гибридные системы передачи

$S_{вх}$ транкового усилителя прямого канала.....	+9 дБ·мВ
$S_{вых}$ транкового усилителя прямой канала	+32 дБ·мВ
$S_{вх}$ фидерного усилителя прямой канала	+23 дБ·мВ
$S_{вых}$ фидерного усилителя прямого канала.....	+47 дБ·мВ

Вычислим показатели системы передачи в прямом направлении.
Кроссмодуляция транкового усилителя прямой передачи равна:

$$СХМ_{yc} = СХМ_0 - 2 (S_{вых} - S_0) = 57 - 2 (32 - 48) = 89 \text{ дБ.}$$

Тогда, каскад из 15 таких усилителей будет производить кроссмодуляцию:

$$СХМ_{r\sum} = СХМ_{yc} - 20 \lg n = 89 - 20 \lg 15 = 65 \text{ дБ.}$$

Показатель шума отдельного транкового усилителя будет равен:

$$C/N_{yc} = S_{вх} + 59 - F = +9 + 59 - 10 = 58 \text{ дБ.}$$

Тогда, каскад из 15 таких усилителей будет создавать шум:

$$C/N_{r\sum} = C/N_{yc} - 10 \lg n = 58 - 10 \lg 15 = 46 \text{ дБ.}$$

Кроссмодуляция фидерного усилителя прямой передачи равна:

$$СХМ_{yc} = СХМ_0 - 2 (S_{вых} - S_0) = 57 - 2 (47 - 52) = 67 \text{ дБ.}$$

Тогда, каскад из 3 таких усилителей будет производить кроссмодуляцию:

$$СХМ_{ф\sum} = СХМ_{yc} - 20 \log n = 67 - 20 \log 3 = 57,5 \text{ дБ.}$$

Шум прямого направления фидера с тремя усилителями будет очень незначительным при данном достаточно высоком входном уровне +23 дБ·мВ (это означает, что $C/N_{ф\sum}$ очень велико), поэтому отношение 46 дБ, полученное для прямого транка, можно принять за отношение C/N всей системы прямой передачи.

Используя диаграмму для комбинирования отношений 65 дБ и 57,5 дБ, получим, что общий показатель СХМ прямого канала равен около 54,5 дБ. Показатель C/N прямого канала, как только что установили, равен 46 дБ.

Определим теперь показатели C/N и СХМ обратного направления передачи.

Из спецификации системы известно, что показатели C/N и СХМ всей системы передачи равны 42 дБ и 52 дБ, соответственно путем комбинирования находим, что для обратного канала они составляют 44,5 дБ и 65,5 дБ. Здесь уже, в отличие от прямого направления, нельзя просто пренебречь вносимым шумом от фидерной структуры, поскольку вклад шума фидерной структуры, включающей 400 усилителей, довольно значителен. Поэтому распределим отношение C/N всей системы обратного направления передачи 44,5 дБ между транковой и фидерной системой обратной передачи, например так: 50 дБ для фидера и 46 дБ для транка. Можно убедиться, что комбинирование этих двух значений дает требуемые 44,5 дБ.

Чтобы закончить расчет, следует определить показатели кроссмодуляции эквивалентных каскадов транковых и фидерных усилителей.

Число усилителей в эквивалентном транковом каскаде:

$$N_{эkv,т} = \sqrt{100 \cdot 15} = 39.$$

Исходя из этого, найдем входной уровень в каскаде из 39 транковых усилителей, необходимый для обеспечения показателя C/N , равного 46 дБ:

18.6. Особенности проектирования обратного канала

$$S_{\text{вх}} = F + C/N_{\tau\Sigma} + 10 \lg 39 - 59 = 7 + 46 + 10 \lg 39 - 59 \approx 10 \text{ дБ·мВ.}$$

При заданном усилении 20 дБ и входном уровне +10 дБ·мВ выходной уровень усилителя будет равен +30 дБ·мВ. Вычислим показатель СХМ для каскада из 15 транковых усилителей, работающих при выходном уровне +27 дБ·мВ:

$$\text{СХМ}_{\tau\Sigma} = \text{СХМ}_0 - 2 (S_{\text{вых}} - S_0) - 20 \lg n = 57 - 2 (30 - 50) - 20 \lg 15 = 73,5 \text{ дБ.}$$

Число усилителей в эквивалентном фидерном каскаде:

$$N_{\text{экв.ф}} = \sqrt{400 \cdot 3} = 35.$$

Входной уровень сигнала, требуемый в каскаде, из 35 фидерных усилителей обратной передачи для обеспечения 50 дБ отношения C/N можно найти так:

$$S_{\text{вх}} = F + C/N_{\text{ф}\Sigma} + 10 \lg n - 59 = 7 + 50 + 10 \lg 35 - 59 \approx 13 \text{ дБ·мВ.}$$

При заданном усилении 23 дБ и входном уровне +13 дБ·мВ выходной уровень усилителя будет равен +36 дБ·мВ. Вычислим кроссмодуляцию эквивалентного каскада из 3 фидерных усилителей, работающих при выходном уровне +36 дБ·мВ:

$$\text{СХМ}_{\text{ф}\Sigma} = \text{СХМ}_0 - 2 (S_{\text{вых}} - S_0) - 20 \lg n = 57 - 2 (36 - 50) - 20 \lg 3 = 75 \text{ дБ.}$$

Теперь можно комбинировать полученные показатели для транка и фидера, чтобы найти показатели обратного направления передачи в системе:

C/N транковой системы обратной передачи	46 дБ
C/N фидерной системы обратной передачи	50 дБ
Общее C/N обратного канала	44,5 дБ
СХМ транковой системы обратной передачи	73,5 дБ
СХМ фидерной системы обратной передачи	75 дБ
Общий СХМ обратного канала	68 дБ

Далее комбинируем эти показатели с найденными ранее показателями системы передачи прямого направления и получим результирующие показатели двунаправленной системы при передаче по петле (в оба направления):

Общее C/N прямого канала	46 дБ
Общее C/N обратного канала	44,5 дБ
C/N двунаправленной системы	42 дБ
Общий СХМ прямого канала	54,5 дБ
Общий СХМ обратного канала	68 дБ
СХМ двунаправленной системы	53 дБ

Оба итоговых показателя передачи по петле в нашей двунаправленной системе согласуются с требованиями спецификации, а по кроссмодуляции даже имеем некоторый запас, так как минимальное требуемое значение составляет 65,5 дБ при полученном 68 дБ.

При выполнении проекта на основе одного кабеля расчеты будут менее сложны, поскольку не придется учитывать две отдельные подсистемы (транковую и фидерную) и потребуются только одна серия вычислений. Расчеты интермодуляции здесь были проведены на основе показателя СХМ, но та же ме-

Глава 18. Гибридные системы передачи

тодика будет применяться и в случае расчета интермодуляции с учетом показателя комбинационных искажений третьего порядка (СТВ).

Все результирующие показатели двунаправленной системы удобнее привести в виде табл. 18.1.

Таблица 18.1

Показатели двунаправленной системы

Подсистема	Отношение С/Н, дБ	Показатель СХМ, дБ
Прямой транк	46	65
Прямой фидер	–	57,5
Прямой канал	46	54,5
Обратный транк	46	73,5
Обратный фидер	50	75
Обратный канал	44,5	68
Вся система	42	53

В итоге оценим масштабы такой системы. Если в системе установлено 100 транковых и 400 фидерных усилителей (соотношение количества фидерных и транковых усилителей 4:1) и допускается не более 2 транковых усилителя на 1 км кабеля, то общая протяженность транковой структуры будет составлять около 50 км, а общая протяженность фидерной структуры – около 200 км. Можно сказать, что для условий большого города этот пример не является неправдоподобным.

Еще одна особенность проектирования обратного канала заключается в определении усиления обратного канала. В процессе проектирования прямого направления системы передачи отдельно регулируем уровни передачи или длины кабелей (если это позволяет местность) между усилителями, чтобы распределить по участку потери, вносимые делителями и ответвителями. Это обеспечивает соответствие входных и выходных уровней сигналов требуемым значениям, хотя усилительные участки могут в результате различаться по длине. В процессе проектирования обратного направления передачи невозможно отдельно распределять по маршруту системы усилители обратного канала, поскольку их расположение диктуется расположением усилителей прямой передачи. Усиление в обратном канале иногда бывает трудно рассчитать из-за внесенных ранее пассивными приборами потерь, которые рассчитывались для прямого канала относительно его усиления. Причина в том, что потери в пассивных приборах можно считать практически равномерными, тогда как потери в кабеле на частотах прямого и обратного каналов значительно различаются.

На рис. 18.7 приведен пример, поясняющий эту ситуацию. В верхней части рис. 18.7 показан участок кабеля, соединяющий два усилителя прямой передачи. Потери передачи только в кабеле на промежуточной частоте 220 МГц составляют 20 дБ, а потери передачи на частоте 30 МГц, наивысшей частоте обратного канала, составляют примерно 7,2 дБ. В этих условиях, разумеется, для прямой передачи необходимо усиление 20 дБ, а для обратной усиление 7,2 дБ. В нижней части рис. 18.7 показан тот же участок с включенными в него двумя делителями, вносящими “равномерные” потери 7 дБ на участке. При проектировании прямого

18.6. Особенности проектирования обратного канала

направления передачи можно было бы учесть эти дополнительные потери, расположив второй усилитель ближе к первому. Тогда потери передачи в прямом канале на частоте 220 МГц будут равны 13 дБ, как показано на рисунке. На верхней частоте обратного канала 30 МГц этот же участок кабеля (с потерями 13 дБ на частоте 220 МГц) имеет потери только 4,7 дБ, но два делителя по-прежнему вносят свои потери в размере 7 дБ, поскольку, как сказано, эти делители имеют ровную частотную характеристику. Теперь усилитель обратного канала должен обеспечивать усиление 11,7 дБ для компенсации потерь 7 дБ на делителях и 4,7 дБ в кабеле, тогда как ранее требовалось усиление только 7,2 дБ.

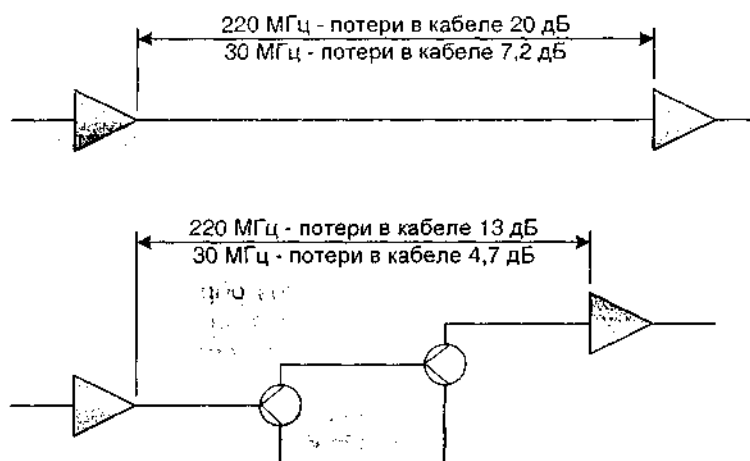


Рис. 18.7. Потери обратной передачи

Это сильное различие в усилении прямого и обратного каналов, связанное с разностью вносимых потерь, будет особенно заметно в сетях с высокой ответвительной нагрузкой. Нужно обеспечить усиление обратного канала, достаточное для компенсации потерь в наихудшем случае (т.е. на участке с наибольшей нагрузкой), а затем по нему выровнять уровни на входах усилителей во всех остальных кабельных участках (с меньшей нагрузкой), чтобы поддерживать правильные рабочие входные и выходные уровни на всех усилителях обратного канала. Зачастую это является причиной того, что усиление в усилительных модулях обратного канала оказывается неприемлемо высоким, приводя к росту интермодуляции. Таким образом, поскольку обратный канал должен соответствовать по длине усилительных участков спроектированной структуре прямой передачи, а рабочие уровни на всех усилителях должны быть одинаковыми, следует использовать входное выравнивание в обратном канале.

Другой возможностью является поочередное усиление сигнала в обратном направлении передачи. Поскольку кабельные потери в обратном канале много меньше, чем кабельные потери в прямом направлении передачи, можно рассмотреть возможность усиления сигнала в обратном канале лишь на каждой второй станции системы передачи. Это серьезно уменьшит количество необходимых усилителей обратного канала, а также снизит вносимую интермодуляцию и шумы. Теоретически, и даже практически, такое решение возможно, но существуют веские аргументы против него. Если оборудовать усилительным

Глава 18. Гибридные системы передачи

модулем обратного канала только каждую вторую станцию, то отклонения уровней сигнала в обратном канале вырастут, так как увеличится расстояние между усилителями a , значит, разность между входным и выходным уровнем любого обратного усилителя увеличится также. Можно ожидать, что в системе с обратным каналом будет очень много точек, являющихся источниками сигнала. Фактически каждый абонент сможет отправлять свой индивидуальный сигнал на головную станцию. Если в этих условиях усилительные участки обратного канала увеличатся за счет отсутствия усиления на каждой второй станции, то выходной уровень, необходимый оборудованию всех этих абонентских установок может стать гораздо выше и потребуются какая-нибудь сложная или дорогая процедура регулировки выходных уровней.

Поэтому такой подход применим только, если в системе необходимо поддерживать обратную передачу из небольшого числа отдельных точек, а проблему совместимости выходных уровней нескольких устройств можно решить. Такая ситуация может встретиться, когда несколько учреждений, подключенных к системе, будут передавать свои сигналы по обратному каналу. Каждую передающую станцию можно настроить так, чтобы уровень генерируемого ею сигнала точно совпал со входным уровнем первого усилителя обратного канала на пути сигнала. Это представляет довольно значительные неудобства, но технически осуществимо, при малом числе источников обратного сигнала. С другой стороны, если огромное количество конечных станций генерирует обратные сигналы, как в случае полностью интерактивной сети для всех абонентских терминалов, то проблема совместимости уровней сигналов на всем этом множестве устройств имеет совсем другой характер. Обеспечивая небольшие приращения усиления для всех усилителей обратного канала можно заставить все источники сигнала работать при стандартном компромиссном выходном уровне. В результате получим ограниченное допустимое отклонение уровней, поскольку потери в каждом участке кабеля будут ограничены путем уменьшения усилительного участка. Экономические преимущества ведения стандартного выходного уровня для всех абонентских терминалов становятся наиболее привлекательными при увеличении числа интерактивных терминалов.

При проектировании двунаправленной системы большой проблемой является накопление шума в обратном канале. В схеме сегмента системы транкфидер на рис. 18.6 включено 6 магистральных усилителей и 18 фидерных усилителей. Этот сегмент может повторяться несколько раз в большой системе городского масштаба. В этой главе уже рассматривался пример, где все фидерные усилители обратного направления вносят в обратный канал шум, который накапливается на принимающей стороне головной станции. В связи с этим встает вопрос о необходимости подавления шума обратного канала таких протяженных систем.

В интерактивных системах на основе технологии опроса в каждый момент времени только одна абонентская станция получает возможность передавать информацию, благодаря чему можно значительно улучшить показатели системы передачи для обратного канала. Для интерактивности в таком режиме не обязательно, чтобы вся система обратной передачи была постоянно подключена к головной станции. Действительно, поскольку, головная станция в каждый момент принимает информацию только от одной абонентской станции, а эта станция расположена на очень маленьком, включающем один фидер, участке сети, то можно, по крайней мере на некоторое время, отключить осталь-

ную часть фидерной структуры обратного направления. Это позволяет устранить на необходимый промежуток времени множество источников шума, не относящихся к передающей абонентской станции. Когда система обращается к определенной станции и разрешает ей передачу, то обращение происходит не только к этой станции, но и к связанному с ней мостовому усилителю, с которого начинается фидерный кабель, питающий данную станцию. Если отключить всю фидерную структуру, которая в данный момент не задействована в обратной передаче, то прямая передача в системе не будет затронута и останется непрерывной. Это означает, что в данный момент прекратится вся обратная передача, за исключением сигналов от той определенной станции, с которой система работает на данном интервале времени.

Воспользуемся данными предыдущего примера и найдем количество усилителей в эквивалентном фидерном каскаде:

$$N_{\text{эв}} = \sqrt{n \cdot m} = \sqrt{400 \cdot 2} \approx 29,$$

где n – общее число фидерных усилителей в сети, m – максимальное число усилителей в фидере.

Теперь предположим, что отключены все фидерные структуры, кроме одной (той, в которой находится передающая станция), и что в этой оставшейся структуре расположено всего 10 фидерных усилителей. Количество усилителей в эквивалентном фидерном каскаде тогда будет равно:

$$N_{\text{эв}} = \sqrt{n \cdot m} = \sqrt{10 \cdot 2} \approx 5.$$

Получаем, что в эквивалентном каскаде только 5 усилителей вместо 29. Можно убедиться, что при том же входном уровне сигнала для фидерных усилителей обратной передачи отношение C/N фидера обратной передачи будет почти на 8 дБ лучше при условии отключения незадействованных фидерных структур. Трудно установить точно, сколько усилителей обратного канала можно установить, не прибегая к отключению фидера, но это число измеряется несколькими сотнями.

В случае поддержки интерактивности только на основе процедуры опроса метод отключения обратного направления фидера для ограничения шума дает хорошие результаты. Но применение этого метода ограничивает возможность интерактивного взаимодействия в режиме реального времени. Если, например, необходимо поддерживать постоянную обратную передачу видеосигналов из одной точки фидерного кабеля, отключение фидера прервет передачу. Тот мостовой усилитель, который питает данный фидерный кабель, не может быть оборудован устройством отключения, поскольку такая точка должна иметь доступ на головную станцию все время, тогда как все другие фидерные кабели могут включаться и отключаться по необходимости. Поэтому если в сети планируется предоставлять услуги, требующие взаимодействия в реальном времени, такие как телефонная служба или видеоконференция или другие мультимедиа, то необходимо будет использовать другое решение.

Метод снижения шума путем отключения обратного направления фидера увеличивает затраты и требует усложнения каждого мостового усилителя, который должен быть снабжен приемником и декодером контрольной несущей, по которой передаются команды от контроллера головной станции, а, кроме того, каждый усилитель должен быть специально оборудован для отключения

Глава 18. Гибридные системы передачи

обратного направления передачи фидерной структуры. Снижение шума, которое становится возможным за счет отключения фидера, позволяет использовать в других частях системы элементы, вносящие больше шума, например, такие транковые усилители прямой или обратной передачи, которые могут повысить экономическую эффективность всей структуры. Однако, следует заметить, что в больших городских системах даже применение метода отключения фидера не может устранить накопленный при обратной передаче шум от большого числа транковых усилителей обратного канала и нужно применять другие методы.

Некоторое уменьшение шума, накапливающегося в обратном канале, возможно, если сигналы от головной станции будут подаваться по нескольким отдельным коаксиальным кабелям. В этих условиях шум, накопленный от всех усилителей, распределяется между этими несколькими кабелями, хотя спектр обратной передачи остается общим для них. В результате одна большая система фактически является образованной из двух или трех параллельных систем меньшего размера с меньшими шумами. Поочередное усиление в обратном канале также позволяет снизить шумы в нем. В главе, посвященной передаче данных, будем возвращаться к методам подавления шума в обратном канале.

Резюме

Гибридные системы по сравнению с полностью коаксиальными системами обеспечивают более высокое качество передачи и более экономичны по сравнению с полностью оптическими системами. Они проще в проектировании и строительстве, поскольку их расчеты в основном сводятся к балансу потерь в оптическом звене и входному уровню оптического приемника. Если баланс потерь выполнен, то показатели системы передачи гарантированы используемым оптическим оборудованием. Качество передачи во всех оптических звеньях может считаться примерно одинаковым и это еще одно достоинство гибридной системы. Коаксиальные части распределительных сегментов желательно строить на основе одинаковых усилительных каскадов. Длина каскада в гибридной сети меньше, чем в полностью коаксиальной, поэтому регулировка может не понадобиться. Контролировать уровни передачи в ходе технического обслуживания необходимо как в оптическом оборудовании, так в радиочастотном коаксиальном оборудовании. Надежность и пропускная способность в гибридной системе значительно повышается благодаря тому, что каждый распределительный сегмент питается от своего волокна и полностью изолирован от любого другого узла, в системе как по уровням сигнала, так и по возможным неисправностям.

Технология двунаправленной передачи в настоящее время активно осваивается. Скорость продвижения двунаправленных систем на рынок телекоммуникационных услуг в большой степени зависит от рентабельности, которую продемонстрируют новые интерактивные службы и от дальнейших технических достижений в этой области.

АБОНЕНТСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Все устройства сети КТВ, устанавливаемые на выходе оконечной абонентской точки будем называть абонентским или терминальным оборудованием. Терминальное оборудование служит для получения абонентом передаваемого сигнала в том виде, в котором его способен воспринять конечный обслуживаемый прибор – телевизионный приемник. Для обслуживания абонентской точки используется целый комплекс абонентского оборудования, которое можно классифицировать как стандартное и дополнительное. Под стандартным оборудованием подразумеваются те средства, которыми должна быть снабжена каждая абонентская точка. Как правило, это пассивный абонентский ответвитель, абонентская розетка (если она предусмотрена), делители сигнала и абонентские кабели для внутриквартирной разводки и, разумеется, телевизор. Дополнительное оборудование включает множество различных устройств, для некоторых из которых еще не установлены единые стандарты. По функциональному назначению можно выделить три типа дополнительных устройств. Устройства первого типа предназначены для защиты системы от несанкционированного доступа в нее со стороны абонентов. Устройства второго типа реализуют интерфейс между распределительной кабельной сетью и телевизионным приемником, а, проще говоря, служат для конвертирования частот кабельной сети в диапазон частот, принимаемый телевизором. Обычно устройства, выполняющие первую и вторую функции, объединяются в одном блоке. К функциям устройств третьего типа относится организация интерфейса сети с конечными абонентскими приборами, не связанными с приемом телевизионных программ. Характеристики и конфигурации такого оборудования зависят только от набора услуг, предоставляемых абонентам кабельной сетью. Одно из таких устройств, называемое кабельным модемом, рассматривается в следующей главе о передаче данных по кабельной сети. В этой главе рассмотрим стандартное абонентское оборудование и оборудование защиты системы от несанкционированного доступа.

В рассматриваемом случае, сигнал в абонентской точке принимается в аналоговой форме, поэтому функцию преобразования сигнала в АМ абонентское оборудование выполнять не должно. Если же сигнал в абонентской точке имеет модуляцию QAM или QPSK, то для его приема нужен цифровой телевизор или специальное абонентское декодирующее устройство, которое здесь не рассматривается. В большинстве российских сетей используется аналоговая передача, т.е. сигнал преобразуется в АМ (PAL или SECAM) на подголовной или головной станции.

19.1. Стандартное оборудование абонентской точки

К стандартному оборудованию относится пассивное распределительное устройство, организующее абонентское ответвление, кабель абонентского от-

Глава 19. Абонентское оборудование

ветвления, по которому сигнал подается из ветви домовой сети в квартиру абонента и, если требуется, абонентский кабель для внутриквартирной разводки. Абонентской точкой является окончание кабеля абонентского ответвления или вход этого кабеля в квартиру. Абонентская розетка как таковая может отсутствовать в квартире абонента, тогда на выходе кабеля абонентского ответвления используется обычный коаксиальный разъем. Абонентская точка является точкой перехода от наружной коаксиальной кабельной структуры к более гибкому коаксиальному кабелю, проводимому внутри помещений. Обычно в качестве кабеля абонентских ответвлений используется кабель RG-6, а для квартирной разводки кабель RG-6 или RG-59. Прокладка оптического кабеля до абонентской точки является пока экзотикой в российских условиях, хотя принципиальных отличий в этом случае нет, кроме дополнительного интерфейса, который будет преобразовывать оптический сигнал в электрический.

Любой стандарт электрических кабельных сетей требует, чтобы внешний проводник коаксиального кабеля был заземлен в той точке, где абонентское ответвление входит в дом или квартиру абонента. Это делается с помощью различных заземляющих приспособлений, которые обеспечивают электрическое соединение точки нулевого потенциала с внешним проводником, не нарушая непрерывности электрической цепи внутреннего проводника. Практически все бытовые телевизионные устройства (телевизор, видеомаягнитофон, видеоплеер, спутниковый ресивер) не имеют собственного заземления. Оно осуществляется через коаксиальный кабель, подключаемый к антенному входу устройства и гальваническая развязка таким заземлением не обеспечивается. Заземленный кабель соединяет корпус телевизора с заземлением электрического щитка на лестничной площадке, поэтому корпуса всей телевизионной техники оказываются на одном «нулевом» потенциале, однако, этот «нулевой» потенциал может отличаться от потенциалов корпусов других имеющихся в доме бытовых электроприборов. Это чревато появлением помех на экране телевизора, или выходом его из строя, или, что еще хуже, возможностью поражения электрическим током. Чтобы этого избежать, необходимо в абонентской точке установить изолятор земли – приспособление, обеспечивающее гальваническую развязку между корпусом телевизора и «нулевым» потенциалом щитка на лестничной площадке. В квартирах, оборудованных электроплитами и розетками без контакта заземления (таковы практически все отечественные бытовые розетки), это особенно актуально.

Для подключения абонента могут использоваться все доступные абонентские распределительные устройства (ответвители и делители). Эти устройства аналогичны тем, что находятся вне помещения абонента и выполняют те же функции, за исключением того, что они, как правило, не пропускают ток питания. Абонентское ответвление в домовой сети организуется с помощью ответвителя или делителя. Эти же пассивные приборы используются внутри помещения абонента, когда необходимо подать сигнал на более чем один телевизионный приемник в квартире или, например, для обслуживания двух соседних квартир в доме. Способы включения абонентских ответвителей и делителей аналогичны тем, что были рассмотрены в гл. 15 и 16 для распределительных сетей более высокого уровня. Пассивный ответвитель является наиболее широко используемым устройством. В сетях кабельного телевидения могут устанавливаться и активные абонентские ответвители, которые в дополнение к своим обычным функциям, могут использоваться для включения и отключения

обслуживания абонента, т.е. для контроля его доступа в сеть. Некоторые активные ответвители могут даже выполнять функцию декодирования сигнала и разрешать избирательный доступ к каналам. Такие ответвители используются редко ввиду сложности их конструкции, высокой стоимости и необходимости питания, которое подается из кабельной сети. Обычно указанные функции выполняет дополнительное оборудование, речь о котором пойдет дальше.

Стоит сказать отдельно о внутриквартирной разводке кабеля. Строго говоря, эта часть абонентского оборудования не является стандартной в том смысле, как это здесь рассматриваем, т.е. не является обязательной. Однако, сейчас, когда количество и разнообразие абонентских устройств увеличивается, разводка кабеля в квартире по желанию абонента становится обычным делом. Доступность бытовой техники для рядовых потребителей упрощается. Как правило, в квартире (в разных комнатах) имеется не один телевизор, практически всегда видеомагнитофон, а иногда и спутниковый приемник. Все эти устройства нужно соответствующим образом подключить к одной абонентской точке с помощью внутренней кабельной разводки. Для возможности получения по кабельной сети цифровых услуг потребуется еще подключить компьютер. Те же принципы внутренней разводки будут применяться и для подключения нескольких соседних квартир к одному кабелю абонентского ответвления, т.е. к одной абонентской точке. Абонентская разводка требует тщательного расчета уровней сигналов на каждом абонентском ответвлении на нижней и верхней частотах полосы передачи, поскольку потери в кабеле зависят от частоты. Во многих кабельных сетях на распределительном уровне используется не весь диапазон МВ/ДМВ, а лишь диапазон до 400 МГц, принимаемый практически всеми современными телевизорами, куда конвертируется основной пакет телевизионных каналов.

Внутренняя разводка может осуществляться по любой из стандартных многоточечных топологий. Подключение устройств по звездообразной топологии выполняется с помощью делителя, подключаемого к выходу абонентской точки. Делитель может делить сигнал по различному количеству выходов (2, 3, 4 и более) в зависимости от потребностей абонента. Действительные значения ослабления сигнала на любом выходе делителя составляют: около 3,5 дБ для делителя на 2, около 5 дБ для делителя на 3, около 8 дБ для делителя на 4. На неиспользуемые выходы делителя устанавливаются согласующие заглушки (75 Ом). Поскольку мощности сигналов на каждом выходе делителя одинаковы, этот способ разводки обеспечивает равномерное распределение сигнала по всем абонентским устройствам и позволяет установить только одно распределительное устройство в квартире, но увеличивает расход кабеля. Подключение устройств по древовидной топологии, т.е. последовательно через ответвления от основного абонентского кабеля, выполняется с помощью ответвителей. Ответвитель ответвляет сигнал из основного кабеля с различным ослаблением в зависимости от номинала. Этим способом труднее обеспечить равномерное распределение сигнала. Он позволяет подключить меньшее число устройств, требует установки нескольких распределительных устройств в квартире, но и меньшего количества кабеля. Кроме того, он обеспечивает высокую развязку между подключаемыми устройствами, что минимизирует их взаимное влияние.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся вариант разводки сигнала – от одной точки на два или более телевизоров. Допустим, что минимальный допустимый уровень сигнала на входе телевизора составляет 0 дБ·мВ (60 дБ·мкВ).

Глава 19. Абонентское оборудование

Сначала для разводки сигнала будем использовать делитель. Чтобы сигнал из абонентского кабеля можно было разделить по крайней мере пополам, необходимо иметь в абонентской точке более высокий уровень, чем 60 дБ-мкВ, а именно, не менее 63 дБ-мкВ, что нетрудно определить, пользуясь правилом комбинирования равных мощностей. К этому следует прибавить потери в самом делителе, составляющие, как минимум, 0,5 дБ, и потере в кабеле, соединяющем выход делителя со входом телевизора. Если предположить, что длина соединительного кабеля в квартире не будет превышать 10 м, то для кабеля RG-59 с потерями около 15 дБ/100 м (на частоте 400 МГц) сигнал понизится на 1,5 дБ. Следовательно, выполнить такую разводку будет возможно, если в абонентской точке имеется сигнал с уровнем не менее 65 дБ-мкВ (для частоты 400 МГц). Разработчик должен предусмотреть возможность подключения нескольких устройств и обеспечить в абонентской точке сигнал с некоторым запасом. Как правило, в кабельных сетях это условие соблюдается – уровень в абонентской точке доводится до 65 – 70 дБ-мкВ, что позволяет сделать разводку сигнала на 3 – 4 устройства. С другой стороны, чрезмерно завышать уровень абонентского сигнала нежелательно, поскольку в этом случае для нормального приема придется устанавливать перед абонентскими точками аттенюаторы, что экономически невыгодно для оператора. Оценка минимального и максимального уровня сигнала на входе телевизора обсуждалась в гл. 13. При разводке сигнала от одной точки на более чем 2 число устройств и при большой длине соединительных абонентских кабелей, например, в случае подключения двух или трех соседних квартир, используются комбинированные схемы с использованием делителей и ответвителей.

На рис. 19.1 – 19.3 показаны широко используемые схемы квартирной разводки для подключения телевизора, видеоманитофона и, в последнем случае, спутникового приемника. В каждом из показанных схем подключение выполнено с помощью делителей на 2, хотя возможны и другие варианты. Делители осуществляют равное деление мощности входного сигнала на 2, 3, 4 или более выходов и надо учитывать, что при каждом делении на 2 мощность сигнала на каждом выходе уменьшается на 3 дБ (реально уровень сигнала падает примерно на 3,5 дБ). Подключение отдельного телевизора осуществляется через высокочастотный антенный вход.

Подключение видеоманитофона может выполняться разными способами по желанию абонента. Если абонент хочет смотреть записанные программы с видеоманитофона одновременно на всех телевизорах в квартире и записывать программы, принятые из кабельной сети или со спутникового ресивера, то видеоманитонфон нужно включить первым, т.е. к его входному ВЧ разъему подключить абонентский кабель, а с его ВЧ выхода подать сигнал на телевизоры (рис. 19.1).

Если видеоманитонфон должен перемещаться от одного телевизора к другому, лучше использовать схему, показанную на рис. 19.2, в которой на ВЧ вход телевизора подается свой сигнал из кабельной сети и выключение видеоманитофона не приводит к разрыву цепи приема. Ближайший к манитонфону телевизор можно подключить по НЧ входу, если он есть у телевизора.

Подключение большинства современных спутниковых ресиверов осуществляется по тем же правилам, что и подключение видеоманитофона, если ресивер имеет антенный ВЧ вход и ВЧ выход (рис. 19.3). Эта схема позволяет записывать сигнал с ресивера или из кабельной сети, и в то же время смотреть на всех телевизорах этот или любые другие каналы.

19.1. Стандартное оборудование абонентской точки

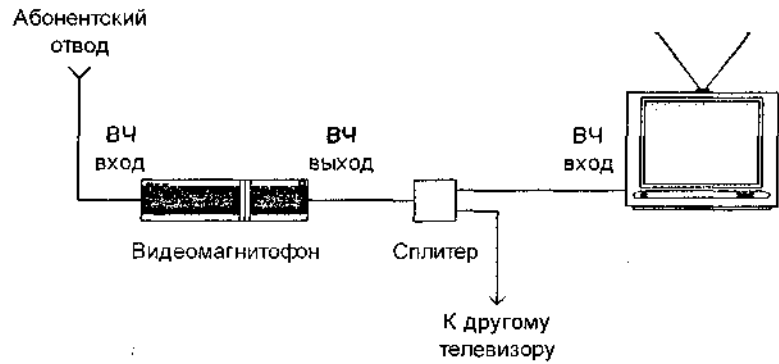


Рис. 19.1. Вариант внутриквартирной разводки

Сети кабельного телевидения могут выполнять еще и функции сетей передачи данных или, иначе говоря, компьютерных сетей. Они используются для поддержки таких приложений как передача данных или файлов, доставка аудио и видео информации по запросу, компьютерная телефония. На основе сети КТВ может быть создана локальная вычислительная сеть (ЛВС, LAN), входящая в состав корпоративных сетей, а также глобальных сетей (WAN). Сети КТВ, интегрированные с сетями передачи данных, пока имеют ограниченную область обслуживания по сравнению с обычными телевизионными, но эта технология развивается и оборудование для нее становится более доступным. Для передачи данных по сети КТВ требуется способность двунаправленной передачи. Подключение компьютера к сети производится посредством кабельного модема. Сам кабельный модем подключается к абонентскому кабелю через отдельное ответвление.

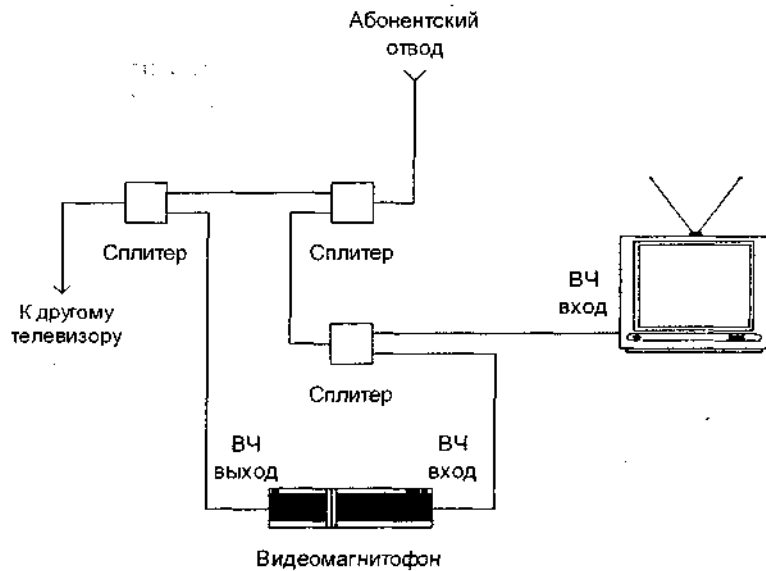


Рис. 19.2. Вариант внутриквартирной разводки

Глава 19. Абонентское оборудование

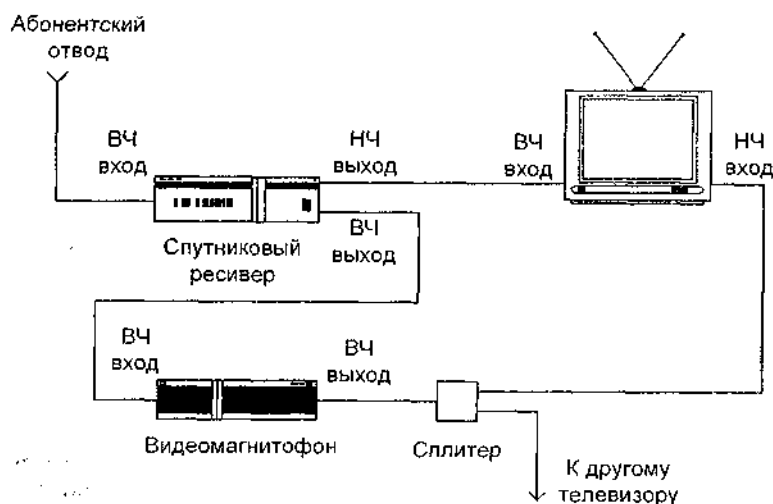


Рис. 19.3. Вариант внутриквартирной разводки

Наконец, важнейшим элементом оборудования абонентской точки является абонентский конвертер. Для передачи телевизионных сигналов в кабельной сети может использоваться весь доступный диапазон частот, установленный стандартом, т.е. от 30 МГц до 1000 МГц. Но далеко не все телевизоры способны принимать сигналы во всем этом диапазоне. Диапазон приема большинства телевизоров ограничивается частотой 580 МГц (верхняя граница поддиапазона ДМВ-IV). Более того, расположенные внутри полосы 30 – 580 МГц каналы поддиапазонов КТВ-I (110 – 170 МГц), КТВ-II и Hyperband (230 – 470 МГц), принимаются далеко не всеми телевизорами. Телевизоры старых моделей вовсе не могут принимать каналы, которые расположены по частоте выше частот стандартного 12-канального диапазона МВ. Следовательно, диапазон приема телевизора практически в любом случае уже, чем диапазон передачи в сети. По этой причине в абонентской точке перед ВЧ входом телевизора необходимо выполнять преобразование, связанное с понижением частот кабельного диапазона в диапазон, принимаемый телевизором любого поколения и любой модели. Это преобразование также называется конвертированием и выполняется с помощью гетеродина, входящего в состав конвертера.

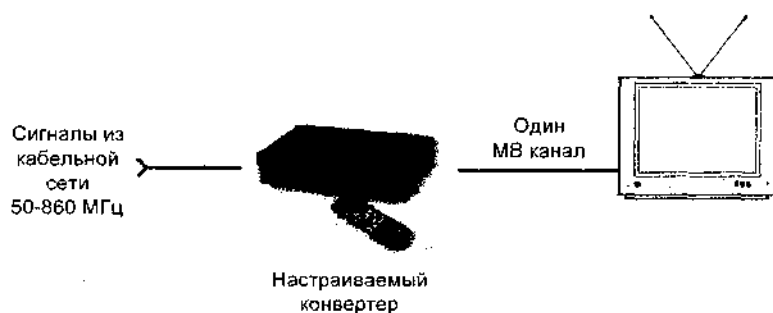


Рис. 19.4. Настраиваемый конвертер

Поначалу применялся метод конвертирования, в котором вся группа кабельных ТВ каналов переносилась в 12-канальный диапазон МВ, чтобы любой телевизионный приемник мог на них настроиться. Недостатки этого метода заключаются в том, что гетеродин не перестраивался, поэтому он не применим в современных сетях, где количество каналов значительно превышает 12. Полоса кабельных каналов, которая конвертировалась в мый диапазон, определялась типом используемого конвертера и была зафиксирована.

Конвертер более сложного типа, который широко используется в настоящее время, способен преобразовывать частоту любого канала кабельной сети в частоту одного фиксированного канала диапазона МВ, принимаемого любым телевизором (обычно в 3-й или 4-й канал). На вход телевизионного приемника, таким образом, может подаваться любой канал кабельного диапазона на частоте диапазона МВ, поскольку в этом случае используется перестраиваемый гетеродин. Настройка на любой кабельный канал производится самим конвертером, а телевизор абонента все время остается настроенным на единственный канал, частота которого соответствует частоте выходного сигнала конвертера. Абонент может с помощью пульта дистанционного управления настраивать конвертер на нужный ему канал и смотреть его на четвертом частотном канале телевизионного приемника. Диапазон приема самого конвертера, конечно, должен быть как можно шире, чтобы охватить большую часть кабельного диапазона 30 – 1000 МГц. Существуют настраиваемые конвертеры с диапазоном 20, 35, 52 каналов и другими. Конвертерный блок располагается рядом с телевизором (рис. 19.4) и получает питание от электрической розетки в квартире абонента.

19.2. Контроль доступа абонентов в сеть

В ходе эксплуатации построенной системы КТВ оператор сталкивается с еще одной задачей – получением с подключившихся абонентов ежемесячной платы за просмотр телеканалов и использование других услуг, предоставляемых сетью. Для того, чтобы абонент платил за обслуживание, оператору нужно иметь средство, ограничивающее доступ абонентов к услугам сети, или, иначе говоря, позволяющее абоненту пользоваться услугами сети только получив разрешение на доступ к ним от оператора сети. При этом, необязательно все каналы в сети будут платными. В современных сетях принято пакетное обслуживание, при котором каналы разбиваются на пакеты (варианты обслуживания) разной стоимости по тематике или любому другому принципу, устраивающему оператора сети. Практически всегда среди них присутствует так называемый социальный или базовый пакет, содержащий минимальное количество важнейших каналов. Как правило, это каналы новостей и местные центральные каналы. Базовый пакет делается бесплатным (открытым), а на остальные пакеты вводится абонентская плата. Развитая сеть имеет не менее 3 – 4 платных пакетов и один базовый. Каждый абонент имеет возможность выбрать из предлагаемых вариантов обслуживания устраивающий его по цене и составу программ вариант или позднее изменить этот вариант на другой. Для подписки на платные пакеты абонент заключает договор с оператором и только после этого получает открытый доступ к ним. Для не подписавшихся абонентов, не обладающих правами доступа, эти же самые каналы должны оставаться закрытыми. Понятно, что при большом числе предлагаемых сетью каналов и пакетов, про-

Глава 19. Абонентское оборудование

блема несанкционированного доступа в сеть становится более острой. Необходимо специальное оборудование, функцией которого является контроль доступа, т.е. управление закрытием и открытием доступа для конкретных абонентов.

Известно несколько способов ограничения и контроля доступа в кабельную сеть. Самым простым и, в то же время, самым ненадежным способом является установка у абонентов полосовых режекторных фильтров-ловушек (trap), вырезающих те частоты спектра, на которых передаются платные каналы. Эти фильтры могут быть одноканальными или широкополосными, вырезающими пакет каналов. С головной станции сигнал подается в доступном открытом виде для всех абонентов, а в требуемых абонентских точках фильтры-ловушки подавляют сигналы платного пакета каналов для конкретных абонентов. Фильтры настраиваются на нужные полосы частот и устанавливаются в абонентском ответвлении в месте включения абонентского ответвителя. Заградительные фильтры лишь в некоторой степени помогают решить проблему ограничения абонентского доступа, поскольку они не выполняют других функций, кроме подавления фиксированной полосы частот, и не могут контролироваться дистанционно с головной станции. Включение или отключение каждого конкретного абонента должно выполняться обслуживающим персоналом на месте вручную. Это самое дешевое и самое нестойкое к взлому решение, поскольку нечестному абоненту достаточно лишь снять этот фильтр.

Другой метод заключается в том, что на головной станции к сигналу платного канала примешивается сигнал помехи очень высокого уровня, несущая частота которого лежит примерно на 2,5 МГц выше несущей изображения, т.е. в полосе яркостного сигнала этого же канала. При получении такого сигнала ТВ приемник воспринимает его как очень сильный полезный сигнал, устройство АРУ уменьшает усиление тюнера приемника до минимума, и полезный сигнал как бы маскируется помехой. У абонента, оплатившего каналы, обслуживающий персонал устанавливает фильтр, который вырезает из сигнала помеху. Этот метод имеет те же недостатки, что и предыдущий, и, помимо того, его особенность заключается в необходимости поддержания точной настройки фильтра при очень узкой полосе. Характеристики фильтров, установленных вне помещений со стабильной температурой и влажностью, могут смещаться, в результате чего их частотно-подавляющие свойства изменяются, поэтому для ослабления влияния температуры внутренность корпуса фильтра обычно заполняется вспененным диэлектрическим материалом. Обойти этот способ защиты, пожалуй, даже проще, чем первый, так как для этого абоненту не нужно искать установленный где-то в стояковом отводе фильтр, а достаточно включить перед входом своего телевизора режекторный фильтр, настроенный на частоту помехи. Существуют варианты этих решений, основанные на частотных искажениях выбранных каналов, когда сигналы изменяются таким образом, что телевизионный приемник не может синхронизировать сигнал и изображение на экране либо сильно ухудшается, либо вовсе не воспроизводится. Однако они также ненадежны и в российских условиях практически не применяются.

Следующим по сложности и стоимости вариантом ограничения доступа в сеть является использование централизованного закрытия (шифрования) передаваемых сигналов. Система работает «с точностью до наоборот» по сравнению с первым вариантом. Все сигналы платных каналов передаются с головной станции в закрытом виде, а в тех абонентских точках, которым разрешен доступ, сигнал дешифруется. Для шифрования сигналов используется так назы-

ваемое скремблирование, которое также называют аналоговым кодированием. Скремблирование может по усмотрению оператора применяться всегда или выключаться в течение определенного времени суток для всех или некоторых каналов. Частичное скремблирование делается в основном для того, чтобы создать дополнительный сервис в сети за дополнительную плату. Выбрав метод скремблирования, оператор устанавливает на головной станции для каждого ТВ канала отдельный скремблер (кодер), располагаемый обычно между спутниковым приемником и ОВЧ модулятором. Какой бы метод скремблирования не использовался в системе, на каждой абонентской станции для санкционированного приема закрытых каналов потребуется специальное терминальное устройство – дескремблер (декодер), включаемый перед ТВ приемником абонента.

19.3. Система адресного контроля

Система скремблирования работает в тандеме с системой адресного контроля (ACS, Address Control System). Система ACS устанавливается, как правило, на центральной головной станции. Ее роль заключается в том, чтобы дистанционно управлять доступом абонентов, т.е. открывать или закрывать любой декодер в системе. Контроль доступа осуществляется путем передачи управляющего сигнала открытия (разрешения доступа) или закрытия (запрещения доступа) конкретному декодеру. Такие возможности управления абонентской базой требуют от головной станции способности обращаться отдельно к каждому декодеру так, чтобы на это обращение отреагировал только данный декодер. Эта способность называется индивидуальной адресацией терминала, а сам декодер – адресуемым (addressable decoder). Для обращения головной станции к декодерам в спектр передачи вводится специальный управляющий сигнал, обычно кодируемый цифровым способом. Единственный управляющий канал используется головной станцией для обращения ко всем декодерам в сети, но в разное время и с помощью различных комбинаций – адресов. Каждый абонентский декодер должен иметь уникальный адрес, который зашит в его энергонезависимой памяти на заводе-изготовителе. Этот адрес является аналогом MAC-адреса или адреса доступа к среде передачи в сетях передачи данных. Изготовитель обязан гарантировать неповторяемость адресов, т.е. в рамках данной системы ACS не должно быть двух терминалов с одинаковыми адресами. С этой целью адреса формируются обычно на основе нескольких параметров, одним из которых является серийный номер терминала. Кроме индивидуального адреса, в память декодера при его изготовлении может быть записан идентификатор сети.

Управляющий сигнал, отправляемый с головной станции, содержит адрес конкретного терминала и собственно управляющую информацию. Для обеспечения правильной работы системы адресации каждый терминал имеет декодер адреса, срабатывающий только при получении управляющего сигнала со своим адресом и игнорирующий управляющие сигналы со всеми другими адресами. Поскольку система заранее не знает, в какой ее части установлен декодер с конкретным адресом, она выполняет рассылку управляющего сигнала по всей распределительной сети. Количество декодеров в одной системе может достигать сотен тысяч. Соответственно, в больших сетях резко возрастают потоки управляющих сигналов. Ситуацию можно упростить опять же сегментировани-

Глава 19. Абонентское оборудование

ем области обслуживания с установкой своей системы ACS на каждой подготовленной станции.

Система ACS реализуется на базе промышленного (желательно) компьютера или персонального компьютера класса IBM PC, выполняющего роль сервера, на котором хранится база данных абонентских терминалов. Этот головной компьютер системы ACS называют также системным контроллером (system controller). В базу, как правило, заносится не только текущий статус декодера (открыт или закрыт), а также и такие данные как фамилия, имя, адрес и телефон абонента, у которого установлен данный декодер, открытые для него пакеты каналов, текущий счет абонента и другие интересующие оператора сети сведения. Для ведения счетов абонентов и контроля оплаты может быть установлен отдельный биллинговый компьютер (billing computer). Периодически, например раз в месяц, система ACS опрашивает всю абонентскую базу на предмет выявления абонентов с нулевым или отрицательным текущим счетом, чтобы закрыть их доступ к услугам сети. Кроме автоматического опроса возможен и режим управления базой со стороны администратора базы данных. В частности, открытие декодера невозможно без вмешательства администратора. Для операций с абонентской базой на сервере или на других компьютерах, подключенных в локальную компьютерную сеть этого сервера, устанавливается специальное программное обеспечение, к которому должен иметь доступ лишь администратор базы данных и возможно некоторый ограниченный круг обслуживающего персонала кабельной сети. Процедура предоставления декодеру доступа в сеть называется авторизацией. Цикл прохождения изменений в абонентской базе ACS, начиная с отправки управляющего сигнала терминалу и заканчивая его открытием или закрытием, называется транзакцией.

Любая транзакция включает следующие фазы:

1. Администратор системы ACS (или сама система) выбирает из базы нужный декодер (например, по его серийному номеру) и инициирует транзакцию, при этом компьютер ACS генерирует управляющий сигнал, содержащий управляющую информацию и адрес конкретного декодера.

2. Управляющий сигнал смешивается с сигналами телевизионных каналов и других служб и поступает в распределительную кабельную сеть, где каждый абонентский декодер в сети получает его и анализирует содержащийся в нем адрес.

3. При несовпадении полученного адреса с собственным адресом, находящимся в памяти, декодер игнорирует управляющую информацию, а при совпадении адреса реагирует на управляющую информацию включением или прекращением декодирования.

Передавать управляющие сигналы каждому декодеру на отдельной частоте, очевидно, не представляется возможным, поэтому все декодеры получают их по одной и той же частоте с разделением во времени. Цифровой управляющий сигнал обычно передается в полосе каждого кодируемого телевизионного сигнала в интервале кадрового гасящего импульса, а иногда на дополнительной звуковой поднесущей, аналогично тому как передается телетекст. Каждый декодер вводит в скремблированный сигнал своего ТВ канала данные управления, при этом управляющих сигналов передается столько же, сколько закрытых каналов в системе, и при переключении на любой из ТВ каналов, декодер воспринимает команды только от кодера этого канала. Другой способ передачи управляющего сигнала – по единственному управляющему каналу на отдель-

ной частотно-модулированной несущей, которая воспринимается декодером постоянно, независимо от его настройки на какой-либо ТВ канал. В том и другом варианте организации управления канала данные управления поступают от формирователя. Формирователь управляющего сигнала (data translator) является цифровым устройством, выполняющим преобразование асинхронных последовательных данных с выхода порта RS-232 главного компьютера ACS в формат, воспринимаемый каналными кодерами. Используется один формирователь на все кодируемые каналы. Формирователь, будучи частью оборудования ACS, как правило, выполняется в виде отдельного устройства, устанавливаемого в стандартную 19-дюймовую стойку. Кодер может быть подключен непосредственно перед ТВ модулятором данного канала, но может подключаться к модулятору и по промежуточной частоте (38,9 МГц для SECAM). Применение того или иного способа подключения зависит от выбранного метода скремблирования. Кодеры также выполняются в виде отдельных приборов, устанавливаемых в стандартную стойку. Управляющий сигнал просто суммируется с выходными сигналами головной станции, поэтому для установки системы кодирования не требуется изменять конфигурацию головной станции, а достаточно включить на ее выходе дополнительный сумматор.

С помощью системы скремблирования и ACS оператор сети может гибко управлять доступом любого абонента к услугам сети, передавая управляющий сигнал с головной станции. В зависимости от характера информации, содержащейся в управляющем сигнале, оператор может закрыть любые каналы в пакете для любого конкретного абонента или для всех абонентов сразу или приостановить обслуживание тех абонентов, которые не оплатили просмотр каких-либо каналов, и все эти действия не требуют выезда обслуживающего персонала к абоненту. Передавая декодеру команду разрешения на декодирование, оператор открывает декодер только на выбранный пакет обслуживания и только на оплаченный им период. Все действия с абонентской базой выполняются с учетом текущих статусов декодеров, отраженных в базе данных ACS, которая постоянно обновляется. Текущий статус декодера определяет его права доступа. Таким образом, система ACS контролирует права доступа всех декодеров в распределительной сети. Иначе можно сказать, что ACS управляет системой скремблирования.

Система ACS позволяет оператору сети разрешить или запретить абоненту просмотр всех каналов сразу или отдельных пакетов. Но на тот случай, если абонента интересует только какая-то конкретная программа или канал, существует возможность предоставления ему права просмотра только этой программы, причем оплачивать он будет не весь пакет, а только нужный ему канал или программу. Такая услуга носит название Pay-Per-View, дословно – оплата за каждый просмотр. Для введения в сети этой услуги оператор должен выделить специальный телевизионный канал (promo channel), информирующий абонента в текстовом виде и с помощью анонсов о времени и содержании предстоящих телепередач, стоимости просмотра и способах оплаты. Настроившись на этот канал, абонент может выбрать то, что его интересует, и сделать заказ. В традиционном варианте Pay-Per-View абонент делает заказ по телефону, набрав номер абонентской диспетчерской службы CSR (Customer Service Representative) или номер автоответчика. Далее абонент сообщает номер своего контракта и указанный на экране код передачи, которую хотел бы посмотреть (для заказа через автоответчик абонент переключает свой телефонный аппарат в то-

Глава 19. Абонентское оборудование

нальный режим и набирает код этой передачи и личный код). Затем диспетчер или автоответчик передает эти сведения в головной компьютер ACS, который должен будет изменить статус данного декодера, разрешив ему доступ к выбранному каналу на время трансляции заказанной телепередачи. Счет абонента при этом автоматически уменьшается на стоимость заказанной телепередачи.

Следует заметить, что адресуемый декодер для выполнения всех вышеописанных функций должен быть довольно сложным и, следовательно, дорогим устройством. Декодер обычно включает собственный демодулятор телевизионных сигналов, декодер адреса, устройство памяти для хранения или записи ключей декодирования, микропроцессор для обработки управляющей информации, тюнер телевизионных каналов и пульт дистанционного управления. Стоимость декодера может составлять 100 – 150 долл. Практика показывает, что для большинства потенциальных абонентов эта цена оказывается высокой (тем более, что к ней еще нужно прибавить стоимость подключения и ежемесячную абонентскую плату), поэтому обычной практикой в российских кабельных сетях является не продажа декодера абоненту, а передача его в аренду на срок, установленный при заключении договора на обслуживание. По завершении срока договора или при отказе абонента от обслуживания декодер демонтируется и в случае исправности может затем использоваться повторно.

Адресуемым абонентским устройством может быть не только декодер, но и активный абонентский ответвитель или делитель. Активный ответвитель умеет принимать от головной станции сигнал, адресованный именно ему, и выполнять функции включения или отключения абонента. Некоторые модели могут даже выполнять декодирование принимаемого сигнала (такие ответвители еще называют интеллектуальными), но здесь они не рассматриваются. Адресный ответвитель или делитель тоже имеет свой уникальный номер и управляется индивидуально с головной станцией. От обычных ответвителей и делителей он отличается тем, что на каждом его выходе установлено электронное устройство, работающее по принципу ключа, т.е. способное по команде разрешить или заблокировать прохождение информационного ТВ сигнала с определенного выхода на вход абонентского отвода. В корпусе ответвителя находится радиоприемное устройство, настроенное на канал управления, и процессор. Процессор декодирует управляющий цифровой сигнал и если выясняет, что этот сигнал адресован именно ему – выполняет содержащуюся в нем команду, формируя сигнал открытия или закрытия определенного выхода ответвителя. Система периодически рассылает управляющие сигналы каждому ответвителю, сообщая ему его текущий статус. Такая система может действовать не только по принципу "все или ничего", включая или отключая обслуживание абонента, но даже позволяет реализовать пакетное обслуживание с помощью нескольких установленных на выходе ответвителя электронных ключей, каждый из которых реагирует на свой управляющий сигнал. Адресные ответвители и делители производят такие фирмы как Electroline Equipment (Канада) и Scientific Atlanta (США).

Установка адресных ответвителей дает оператору возможность дистанционно контролировать доступ каждого абонента к услугам сети и обходится дешевле по сравнению с дорогими системами скремблирования, но, с другой стороны, надежность этого способа защиты так же низка как, например, применение фильтров-ловушек, поскольку сигнал по-прежнему передается в открытом виде. По этой причине такое оборудование вряд ли найдет применение в России. К недостаткам интеллектуальных активных ответвителей относится необ-

ходимость внешнего питания и высокая стоимость, поэтому и они вряд ли будут широко использоваться в российских кабельных сетях, хотя в западноевропейских странах они весьма популярны. В целом, функции, обеспечивающие управление доступом в сеть, чаще переносятся на абонентские терминалы, устанавливаемые в квартирах.

Абонентские терминалы и, соответственно, сама кабельная система, могут поддерживать двунаправленную передачу. Поскольку администратор абонентской базы может обратиться к любому выбранному терминалу с целью ее опроса на предмет подключения или отключения от сети, эта функция может использоваться для реализации различных служб, действующих на основе методики опроса, например, службы тревоги или сигнализации, измерения электрической мощности или концентрации различных веществ в атмосфере (пожарная сигнализация). Именно здесь проходит граница между службами однонаправленной и двунаправленной передачи. Функций, выполняемых при однонаправленной передаче, таких как авторизация, отключение и подключение терминала, вполне достаточно для работы обычных сетей кабельного телевидения, но для обеспечения многих других служб, требующих ответа терминала на запрос головной станции, необходим канал обратной передачи. Если терминальная станция способна не только получать запрос с головной станции, но и отвечать на него сообщением о своем статусе, то такая станция называется интерактивной. Если сеть будет обладать способностью двунаправленной передачи, то независимо от того, какой тип терминального оборудования используется в сети, каждый терминал должен иметь блок, модулирующий несущую обратного канала информационным сигналом для передачи своей информации на головную станцию и демодулирующий полученный с головной станции сигнал для восстановления переданной данному терминалу информации. Распределение спектра передачи обратного канала происходит иначе, чем для прямого канала, поскольку количество передаваемых сигналов здесь будет очень большим (каждый абонентский терминал является самостоятельным источником сигнала), а полоса гораздо уже, чем полоса прямого канала. В связи с этим возникает проблема управления доступом к полосе обратного канала множества абонентов с устранением возможных конфликтов между ними.

В контексте рассматриваемой здесь традиционной системы ACS способность двунаправленной передачи не существенна, поэтому пока будем считать терминалы однонаправленными. Интерактивность терминалов важна для интеграции сетей КТВ с сетями передачи данных (подробнее об интерактивных абонентских терминалах говорится в гл. 21). Однако, существуют системы ACS с некоторыми дополнительными возможностями, предоставляемыми только в двунаправленных системах. К таким возможностям относится интерактивный заказ программ с оплатой за каждый просмотр *Impulse Pay-Per-View*. Эта услуга похожа на описанную выше *Pay-Per-View*, но есть коренное отличие – она предполагает автоматизированный прием заказов. Для того чтобы сделать заказ абоненту не надо пользоваться телефоном, а достаточно просто набрать необходимые комбинации цифр на пульте дистанционного управления своего декодера и нажать клавишу подтверждения оплаты. Абонентский терминал сам сформирует и передаст сигнал заказа головному компьютеру ACS по обратному каналу кабельной сети. Возможна реализация этой услуги и по телефонному обратному каналу, когда абонентский терминал передает сигнал заказа через обычный модем, но абонент никакой разницы не ощущает – в том и другом

Глава 19. Абонентское оборудование

случае ему не нужно снимать телефонную трубку. Удобство этой услуги для абонента очевидно, но сложность ее технической реализации и высокая стоимость абонентского оборудования пока не позволяют сделать ее общедоступной в российских кабельных сетях.

В индустрии кабельных сетей технология адресации абонентских терминалов вошла в повсеместное использование. Обычно функции конвертирования частот и ограничения доступа выполняет одно устройство, называемое абонентским конвертором-декодером. Таким образом, на телевизор абонента подается уже дескремблированный и конвертированный сигнал низкой частоты диапазона МВ или ДМВ, а конструкция конвертора-декодера позволяет управлять переключением каналов, в том числе и не скремблированных, путем выбора номера канала кнопками на передней панели конвертера или с дистанционного пульта. Далее рассмотрим применяемые в современной технике кабельного телевидения методы скремблирования аналогового телевизионного сигнала.

19.4. Системы скремблирования

Скремблирование является наиболее удобным и совершенным методом контроля доступа к передаваемым каналам в аналоговых кабельных сетях. Наиболее логичным представляется совмещение функции конвертера и декодера принимаемых сигналов в одном устройстве, что и делается в большинстве современных моделей абонентских терминалов. Подчеркнем еще раз, что хотя здесь и применяется термин цифровых систем «декодер», на самом деле этот блок не имеет отношения к декодированию, а выполняет так называемое дескремблирование, под которым понимается восстановление исходного аналогового сигнала из видоизмененного аналогового сигнала. Характер этого изменения, называемого скремблированием, не имеет ничего общего с цифровым кодированием, хотя по результату этот способ можно сравнить с кодированием. Скремблирование (от англ. *scramble* – перемешивание) означает перестановку или перетасовку определенных частей сигнала в произвольном, но известном на передающей стороне, порядке. Чтобы восстановить на приемной стороне скремблированный сигнал абонентский конвертор-декодер должен знать порядок скремблирования, установленный на передаче, и произвести обратное преобразование. Открывая определенный декодер, система с головной станции сообщает этому декодеру порядок скремблирования сигнала, чтобы тот мог выполнить его восстановление.

В сетях кабельного телевидения используется несколько методов скремблирования. Среди наиболее популярных можно назвать SSAVI, Line Shear, Line Cut & Rotate. Рассмотрим сначала в общих чертах суть этих методов скремблирования, а затем их конкретные реализации. Скремблирование выполняется специальным оборудованием на головной станции, причем на каждый скремблируемый канал устанавливается отдельный блок скремблирования. В дальнейшем будем называть такой каналный блок кодером, а соответствующий блок обратного преобразования сигнала или дескремблирования на стороне абонента – декодером. Как правило, скремблируется только видеoinформация, а звук передается в открытом виде, но возможна комбинация того и другого. Кодер производит изменение одного или нескольких элементов телевизионного сигнала по некоторому псевдослучайному алгоритму таким образом, что его

непосредственное воспроизведение на приемной стороне делает изображение неразличимым. На экране это может выражаться в беспорядочном хаотичном мелькании строк с кратковременными моментами относительной стабильности. В среднем изображение искажается до такой степени, что его просмотр без авторизованного декодера становится невозможен. Правильное восстановление изображения на приеме возможно только, если декодер абонента синхронно с кодером выполнит обратное преобразование сигнала. Для этого система скремблирования, работающая под управлением ACS, должна с помощью управляющего сигнала сообщить всем декодерам, имеющим право доступа, тот алгоритм, по которому был закодирован сигнал. Современные кодеры в рамках одного метода скремблирования используют несколько алгоритмов кодирования (количество измеряется сотнями) с периодической их сменой, поэтому система должна сообщить декодерам именно текущий алгоритм. Более того, современные кодеры могут скремблировать сигнал несколькими методами разной сложности и предоставлять возможность выбора более или менее сложного метода (или его модификации) по желанию оператора сети. Различные методы, используемые в рамках одной системы скремблирования, называются уровнями или режимами кодирования.

Любая система скремблирования должна отвечать трем главным требованиям. Во-первых, закодированные телевизионные сигналы по своим радиочастотным параметрам не должны отличаться от не закодированных сигналов, чтобы для их передачи можно было использовать то же самое передающее оборудование и те же самые распределительные сети. Во-вторых, субъективная оценка качества восстановленного декодером изображения должна быть не ниже, чем оценка качества изображения не закодированных каналов. Эти требования подразумевают, что изменение сигнала не должно касаться таких основных его характеристик как ширина занимаемой полосы, частоты несущих, амплитуда, глубина модуляции и не должно привести к потере его информативности. Т.е. закодированный сигнал должен иметь ту же модуляцию, занимать ту же полосу частот (или, по крайней мере, не большую) и нести ту же информацию, что и обычный сигнал. Наконец, система скремблирования должна иметь возможность использоваться для всех основных телевизионных стандартов (PAL, SECAM, NTSC), в том числе и для SECAM D/K(OIRT).

Для облегчения этой задачи в ряде систем используются упрощенные методы скремблирования, когда изменению подвергаются только элементы сигнала, не относящиеся к строкам изображения, например синхроимпульсы. Метод, основанный на маскировании или подавлении строчных импульсов синхронизации, называется SS (Sync Supression). Кодер накладывает на сигнал изображения последовательность прямоугольных импульсов, попадающих точно в интервалы синхроимпульсов, и тем самым меняет их амплитуду. Синхроимпульсы могут подавляться вовсе или только понижаться с сохранением фронтов. Однако, положение даже подавленных строчных синхроимпульсов можно попытаться определить по гасящему строчному импульсу и по так называемой вспышке, расположенной на площадке этого импульса и строго привязанной к синхроимпульсу строки (в цветном телевидении вспышка используется для цветовой синхронизации). Вспышка занимает не более 4% длительности строки, но этого достаточно, чтобы синхронизировать задающий генератор развертки по частоте и фазе. Поэтому в более сложном варианте реализации схемы SS весь строчный гасящий импульс заполняется синусоидальным сигналом с частотой

Глава 19. Абонентское оборудование

цветовой поднесущей. Результатом применения SS является нарушение строчной синхронизации и беспорядочное смещение строк по горизонтали.

В классическом варианте SS синхроимпульсы строк, приходящиеся на кадровый гасящий интервал, остаются без изменений, а затем используются декодером как опорный сигнал для восстановления синхроимпульсов в активной части строки. Это делается с помощью задающего генератора со схемой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Длительность кадрового гасящего импульса занимает около 12,5% от длительности полукадра, что обеспечивает хорошую стабильность частоты и фазы задающего генератора развертки. Для декодирования в SS не нужна никакой дополнительной информации, поскольку алгоритм кодирования неизменен и декодер заранее его знает. Это обстоятельство позволяет пиратскому декодеру с ФАПЧ легко восстановить подавленные синхроимпульсы. Управляющие сигналы в таких системах не несут управляющей информации как таковой, кроме разрешения или запрещения доступа конкретному декодеру. Строго говоря, такой способ даже не является скремблированием. Наиболее известными примерами реализации SS являются системы Universal-500, CryptOn, Chameleon.

Система CryptOn использует оригинальное решение, совмещающее простоту и дешевизну SS с нелинейным цифровым преобразованием сигнала, что обеспечивает более высокую степень защиты. К каждому кодеру добавляется кадровый синхронизатор – цифровое запоминающее устройство, имеющее буфер на строку с возможностью записи и воспроизведения строки с разными тактовыми частотами. Подобные устройства используются в качестве корректоров временных искажений для источников сигнала с нестабильными характеристиками, например, видеомагнитофонов. Здесь же кадровый синхронизатор, наоборот, намеренно вносит в сигнал временные искажения. Кадровый синхронизатор под управлением кодера меняет свою тактовую частоту воспроизведения строки на некоторую малую величину по псевдослучайному закону, меняя тем самым длительность строки. Соответственно меняется и частота следования строчных синхроимпульсов. За время полукадра переключение тактовой частоты синхронизатора происходит несколько раз, в результате чего полукадр формируется из строк различной длительности. Изменение длительности строк должно быть небольшим, чтобы на экране не были заметны геометрические искажения. Строчные синхроимпульсы из сигнала также удаляются, как и на втором уровне защиты. Схема ФАПЧ пиратского декодера, пытающаяся восстановить синхроимпульсы при переменной длительности строк не способна оперативно отследить эти изменения, поэтому его задающий генератор продолжает с постоянным периодом синтезировать синхроимпульсы, которые не соответствуют их истинному текущему расположению (оказываются смещенными) и, в конце концов, смещение увеличивается настолько, что синхронизация строк срывается. Авторизованный декодер выделяет из цифрового потока информацию кодера об изменении длительности следующей строки и мгновенно меняет частоту своего задающего генератора в нужную сторону, благодаря чему изображение остается синхронным.

Система Chameleon, разработанная NCA Microelectronics (она же выпускается фирмой Megavision под торговой маркой Megacrypt-2001), тоже сочетает метод SS с цифровым кодированием управляющих данных. В этой модификации метода SS из видеосигнала удаляются все синхроимпульсы, кадровые и строчные, включая расположенные в кадровом гасящем импульсе, т.е. в сигнале не

остаются никаких временных меток, которые можно было бы использовать для восстановления синхронизации. Как же авторизованный декодер сможет расшифровать сигнал? Поскольку просто восстановить синхроимпульсы, как это делалось в предыдущих системах здесь невозможно, их должна синтезировать внутренняя схема декодера по тому алгоритму, который сообщит кодер в управляющем сигнале. Управляющий сигнал, необходимый для восстановления, передается на второй звуковой поднесущей в виде цифровой последовательности длиной 32 бита, кодирующей номер одного из 128 используемых алгоритмов при более чем 4 миллиардах возможных комбинаций. Нетрудно подсчитать вероятность обнаружения алгоритма (период повторения комбинации измеряется годами), но если все-таки оператор имеет основания полагать, что какой-либо алгоритм раскрыт, он просто перестает его использовать. Все 128 алгоритмов хранятся в микросхеме постоянной памяти каждого декодера, которая аппаратно защищена от считывания. Управляющая последовательность передается с частотой полукадров (60 Гц в NTSC или 50 Гц в PAL и SECAM) и ее временное положение относительно начала полукадра непостоянно. Кроме управляющей информации в последовательности содержится номер декодера, которому в данный момент система разрешает декодирование, таким образом, функции авторизации и декодирования здесь неотделимы друг от друга. Декодер анализирует полученную последовательность сперва на совпадение поля адреса (16 бит), а затем, в случае совпадения, по управляющему коду находит нужный алгоритм из хранящихся в памяти и вычисляет текущее положение синхроимпульсов.

Некоторым усложнением метода SS является метод SSAVI (Sync Suppression & Active Video Inversion), в котором маскирование синхроимпульсов совмещено с инвертированием активной части строки. Инвертирование означает изменение полярности аналогового яркостного сигнала, содержащегося в строке телевизионного изображения, на противоположную. При этом уровень белого становится уровнем черного, уровень черного становится уровнем белого, а элементы изображения близкие к средней яркости остаются почти без изменения. Таким образом, в строке формируется как бы негативное изображение. Инвертированию могут подвергаться не все строки, а, скажем, через одну или через две или в псевдослучайном порядке – это повышает степень защиты. Как правило, синхроимпульсы строк не удаляются полностью, а только смещаются по уровню. Комбинируя различные порядки инвертирования с подавлением синхроимпульсов, можно получить несколько уровней кодирования. Очевидно, без инвертирования система SSAVI превращается в обычную SS. При произвольном порядке инвертирования информация о том, какие строки в текущем полукадре инвертированы (порядок инверсии), передается в начале каждого полукадра – например, в кадровом гасящем импульсе 22 строки для первого полукадра и 335 строки для второго полукадра в виде закодированной последовательности. Данные о статусах декодеров передаются также в кадровых гасящих импульсах несколькими строками. Для повышения защиты в управляющую последовательность может добавляться специальный флаг, являющийся признаком верификации инверсии, т.е. указывающий на то, следует ли верить порядку инверсии. Как и в традиционной SS, строчные синхроимпульсы, расположенные в кадровом гасящем импульсе, передаются без изменений для возможности последующего восстановления. На экране телевизора сигнал, закодированный в SSAVI, выглядит практически неразличимым в отличие от обычной SS.

Глава 19. Абонентское оборудование

Система SSAVI имеет лучшую защиту, чем традиционная SS. Однако, надо сказать, что практически все системы скремблирования, использующие SS с теми или иными модификациями, на данный момент взломаны, схемы пиратских декодеров приведены в Интернет и при желании и наличии деталей сведущий радиолюбитель может самостоятельно собрать такой декодер. Несмотря на это системы с SS до сих пор популярны в России и СНГ, вероятно, по причине их невысокой стоимости. Но популярны они не только на территории Советского Союза. Например, в странах Скандинавии и в США, где, хакеры не чувствуют себя так вольготно, эта технология распространена весьма широко. Системы на основе SS выпускают такие известные фирмы как General Instrument, Jerrold, Pioneer, Zenith, Scientific Atlanta. Примерами реализации метода SSAVI являются системы Tocom и Zenith. В частности, система Tocom эксплуатировалась с 1997 г. в Санкт-Петербурге (сеть "Телеплюс") и в Москве (сеть "Космос-ТВ"). В настоящее время эти сети переведены на систему скремблирования Dalvi, которая рассматривается ниже.

Преимуществами описанных выше методов можно считать простоту реализации и относительно низкую стоимость оборудования, как на стороне головной станции, так и на стороне абонента. Поскольку сама видеоинформация не затрагивается, качество восстановления в них полностью соответствует качеству открытого сигнала. В то же время система должна быть максимально защищена от неавторизованного (несанкционированного) доступа со стороны недобросовестных абонентов. С этой точки зрения оператору не выгодно идти по пути упрощения и дешевизны, а следует выбирать более сложные системы скремблирования. В частности, для повышения степени защиты системы вводится несколько уровней кодирования, о которых уже упоминалось. На более сложных уровнях выполняется нелинейное преобразование сигнала, нарушающее его временную структуру и основанное на некоторых операциях со строками изображения. Например, строки могут смещаться по времени друг относительно друга или может меняться порядок их следования. Здесь уже восстановить кодированный сигнал только по информации, содержащейся в нем самом практически невозможно, для правильного восстановления необходима информация, заключенная в управляющем сигнале. Эта информация, описывающая принятый текущий алгоритм кодирования на головной станции, называется ключом. Чем больше ключей (алгоритмов) используется, тем выше стойкость системы против взлома. Система может использовать ограниченный набор постоянных ключей, изначально зашитых в микросхеме энергонезависимой памяти каждого декодера, или каждый раз загружать новый ключ по эфиру. В первом случае достаточно передать только порядковый номер текущего ключа, а во втором случае необходимо передать полную информацию об алгоритме кодирования. Загружаемый ключ в отличие от постоянного хранится в памяти декодера лишь некоторое время, до прихода нового ключа. Ключ обычно не передается в открытом виде, а тоже кодируется, например, путем его "перемножения" с уникальным номером декодера, которому адресован этот ключ, т.е. один и тот же ключ, переданный разным декодерам, будет выглядеть по-разному. Это дополнительно повышает защиту системы, так как пиратское копирование ключа теряет смысл. Поскольку в каждый момент времени система передает ключ только одному (очередному) декодеру, процесс раздачи текущего ключа всей абонентской базе может занять довольно большое время. По этой причине передать ключ мгновенно всем декодерам нельзя, к моменту

смены ключа все авторизованные декодеры уже должны его иметь. Частота смены ключа варьируется от раза в год до раза в месяц. Разумеется, стоимость головного и абонентского оборудования таких систем скремблирования гораздо выше, но и стойкость к взлому значительно выше.

Кодирование с передачей ключей используется, например, в уже описанной системе Chameleon, где кодер сообщает декодеру алгоритм восстановления. Но сам видеосигнал в этой системе не подвергается изменению, поэтому защите, которую она обеспечивает нельзя считать совершенной. Действительно высокую защиту можно реализовать только с помощью нелинейного цифрового преобразования видеосигнала. Цифровым это преобразование называется потому, что на передающей стороне видеосигнал (весь кадр или отдельные строки) сначала оцифровывается с помощью АЦП, помещается в устройство памяти, где с ним выполняются необходимые операции, а затем с помощью ЦАП видеосигнал снова переводится в аналоговую форму, в которой и передается по сети. При восстановлении принятый аналоговый видеосигнал опять преобразовывается декодером сначала в цифровую форму для выполнения с ним обратных кодированию операций, а затем в аналоговую – для развертки изображения аналоговым телевизором. Таким образом, сигнал является цифровым только, находясь в кодере или в декодере. Системы с цифровым преобразованием объективно гораздо более стойки к взлому, чем аналоговые, так как восстановить оригинальное изображение, анализируя только сам видеосигнал, практически невозможно. Воспроизведение кодированного цифровым способом сигнала, в отличие от аналоговых методов, дает совершенно нераспознаваемое изображение (похожее на сильный шум) так, что по нему невозможно даже догадываться об истинном содержании. Существует несколько методов скремблирования, основанных на цифровом преобразовании. Рассмотрим три наиболее известных.

В сигнале, кодированном методом Line Shuffle, строки внутри каждого полукадра перемешиваются, т.е. меняется порядок их следования, хотя в каждой отдельной строке сигнал остается без изменений. В строчных гасящих интервалах, которые относятся к невидимой части видеосигнала, осуществляется разрыв полукадра на отдельные строки. Качество восстановленного изображения при этом не страдает, так как меняется только структура кадра в целом, но не отдельные элементы изображения. Ключ кодирует номер текущего псевдослучайного порядка (алгоритма) перестановки строк, принадлежащий фиксированному набору (обычно не более 256 алгоритмов). По этому номеру декодер сам генерирует ту же псевдослучайную последовательность перестановки, что и кодер, и таким образом имеет возможность восстановить правильный порядок следования строк. Декодер должен иметь буферное запоминающее устройство, максимальная емкость которого равна количеству строк в полукадре, и высокоскоростной видеопроцессор, поскольку восстановление производится в реальном времени, с эфира. Одна из реализаций этого метода известна под торговой маркой Nagravision (разработка швейцарской фирмы Nagra), она способна работать с системами PAL и SECAM. Модификация Syster этой системы ранее применялась для кодирования аналоговых спутниковых каналов НТВ-Плюс.

Другой метод скремблирования с цифровым преобразованием называется Line Shear. В сигнале, кодированном этим методом, порядок строк не меняется и сигналы синхронизации также остаются неизменными, но активная часть каждой строки может быть смещена по времени вперед или назад относительно

Глава 19. Абонентское оборудование

нормального момента своего начала на величину, меняющуюся от строки к строке. Смещение вперед означает задержку строки, а смещение назад означает передачу строки с опережением. Ключ кодирует номер псевдослучайной последовательности смещений строк в полукадре. Чтобы невозможно было установить истинное начало или конец смещенной строки кодер дописывает строку, заполняя бессмысленным видеосигналом временной интервал перед ее началом или после ее окончания. В результате этих действий строки оказываются произвольно смещенными друг относительно друга, и вертикальная структура кадра нарушается. Понятно, что некоторая часть изображения при таком смещении неизбежно теряется – части строк, выступающие за пределы строчного интервала в ту ли другую сторону, отрезаются. При восстановлении каждая строка укорачивается на величину максимального смещения и кадр становится уже, поэтому максимальное смещение не должно быть большим, чтобы уменьшение размера изображения по горизонтали не стало слишком заметным. Наиболее известными реализациями метода Line Shear являются система кодирования PhaseKrypt, разработанная фирмой Macrovision, и система Dalvi, разработанная фирмой Technetix.

Еще один метод, использующий цифровое преобразование, называется Line Cut & Rotate. Этот метод похож на Line Shuffle тем, что структура кадра тоже разрушается путем разрезания строк, но отличие состоит в том, что здесь разрезание выполняется не в строчных гасящих интервалах, а в активной (видимой) части каждой строки, и меняется не порядок следования целых строк в полукадре, а порядок отдельных частей внутри каждой строки. Строка разрезается в произвольной точке, как правило, на две части, после чего в строке осуществляется перестановка ее частей – окончание строки передается в начале, а истинное начало передается в конце. Положение точки разреза меняется от строки к строке. Ключ кодирует псевдослучайную последовательность точек разреза во всех строках полукадра. Ключ, как и в предыдущих подобных системах, определяет лишь номер алгоритма генерации положения точки разреза в строке (обычно 128 или 256 возможных положений). В процессе восстановления декодер генерирует ту же последовательность, находит точку разреза текущей строки и с помощью буферного устройства памяти на строку и процессора собирает части строки в правильном порядке. Примерами реализации метода Line Cut & Rotate являются системы VideoCrypt (для PAL), VTech и Dalvi. Системы VideoCrypt производства английской фирмы BSB и VTech производства одноименной фирмы имеют один уровень кодирования, использующий Line Cut & Rotate в чистом виде, а уже упоминавшаяся система Dalvi использует этот метод только на одном из четырех возможных уровней. Система EuroCrypt основана на похожем методе, но в ней разрезается и переставляется не сама строка, а ее яркостная и цветковые составляющие. Еще более сложный метод предусматривает перестановку нарезанных частей строк по всему полукадру (комбинация методов Line Cut & Rotate и Line Shuffle).

В настоящее время система Dalvi, выпускаемая фирмой Technetix (Англия), вероятно, обеспечивает наиболее высокую степень защиты из существующих и относительно недорогих систем для кабельных сетей. Система использует метод, применяемый в дорогих системах для защиты спутниковых каналов. Она имеет четыре уровня кодирования и использует на разных уровнях два метода кодирования – на уровнях с первого по третий используется метод Line Shear с различным смещением строк, а на четвертом уровне используется метод Line

Cut & Rotate. По мере повышения уровня кодирования изображение не декодированного сигнала ухудшается. В дополнение к скремблированию изображения может применяться кодирование звука. Сигналы управления передаются в нескольких строках кадрового гасящего импульса каждого кодированного канала. Система Dalvi имеет собственное аппаратно-программное обеспечение для управления абонентской базой, с помощью которого она способна генерировать более 80000 сообщений в час. Разработчик заявляет, что система может работать в сети, имеющей до 99 каналов, обслуживать более 40 пакетов кодированных каналов и услуг, поддерживать функцию Pay-Per-View и работать со всеми существующими стандартами аналогового ТВ (PAL/SECAM/NTSC). Существуют две модификации декодеров Dalvi – с декодированием ТВ сигнала по низкой частоте и с декодированием по высокой частоте.

Систем кодирования, гарантирующих абсолютную защиту, не существует. Рано или поздно любая кодировка взламывается, поэтому оператор всегда должен иметь это в виду и вовремя принимать меры. Наиболее распространенный способ борьбы с пиратством в сетях кабельного ТВ – более частая смена ключей, хотя это и связано с увеличением расходов для оператора. Кроме этого, дополнительно повышают защиту с помощью смарт-карты (smart card) стандарта ISO 7816, которая вставляется в декодер через специальный слот, расположенный обычно на его передней панели. В карту вмонтирован микропроцессор, генерирующий алгоритм декодирования, и устройство памяти, в которую записывается полученный по эфиру ключ. Кроме того, в памяти карты может храниться идентификатор просматриваемого канала, счетчик числа просмотров или счетчик оплаты. Применяются различные типы памяти. Постоянная память (ПЗУ, ROM) не перезаписывается, поэтому может хранить только единственный ключ или какую-либо вспомогательную информацию для работы процессора. Программируемая постоянная память с электрическим стиранием (EEPROM) может быть перезаписана, поэтому именно ее используют для считывания ключей с эфира. Микросхема памяти может быть защищена от считывания, чтобы усложнить жизнь пиратам. Получив управляющий сигнал, карта сравнивает содержащийся в нем адрес со своим уникальным адресом и в случае совпадения расшифровывает ключ, записывает его в свою память и начинает использовать до момента следующей смены. Декодер, таким образом, будет учитывать не собственный постоянный адрес, а адрес карты, которую можно заменить. Система регулярно рассылает сигналы отключения карт, срок действия которых истек. Если карта не авторизована или ее срок истек, то декодирование будет невозможно, а сама карта становится бесполезной. Однако, как оказалось, авторизация доступа с помощью смарт-карт тоже является уязвимым местом, поскольку хакерство в этой сфере процветает, пиратские карты сейчас весьма широко распространены и доступны по цене. После взлома необходима замена всех карт, а это очень дорогой и сложный процесс, поэтому, например, производитель системы Dalvi представляет тот факт, что в ней не применяются смарт-карты, как достоинство. В крайнем случае оператору остается только перейти на новую систему кодирования, которая еще не взломана.

Наиболее часто используемый хакерами прием взлома заключается в получении доступа к памяти декодера или смарт-карты с целью копирования ее содержимого. Ключ хранится в памяти уже в открытом виде и находится там, как правило, довольно долго, поэтому его копирование особенно опасно. Наиболее простой способ защиты от копирования состоит в том, что при вскрытии корпу-

Глава 19. Абонентское оборудование

са выполняется стирание памяти, а в более сложных устройствах используются микросхемы памяти с внутренними схемами защиты, реагирующими на попытку считывания. Другой хакерский прием заключается в экспериментировании с электрической схемой декодера путем установки различных тестовых чипов, вносящих изменения в поток команд управления декодером. Цель – взломать протокол обмена между легальной картой и декодером и имитировать команду включения или заблокировать команду выключения. Еще одна возможность – последовательное изменение битов перехваченного по эфиру обновления закодированного ключа с целью подбора ключа. Этот способ, хотя и кажется самым простым, является наиболее долгим, поскольку перебор всех кодовых комбинаций на современном компьютере займет несколько десятков лет. Вычислительной мощности одного компьютера недостаточно, поэтому хакеры объединяются для решения этой задачи посредством сети Internet и предпринимают совместные атаки на систему кодирования.

Резюме

Из всего комплекса терминального абонентского оборудования можно условно выделить стандартное оборудование, предназначенное для приема телевизионного сигнала, и дополнительное оборудование, реализующее различные функции – от декодирования ТВ сигнала до поддержки услуг сетей специального назначения (сигнализация, передача данных). Стандартное оборудование необходимо для ввода ТВ сигнала в квартиру абонента и его конвертирования из кабельного диапазона частот в диапазон, воспринимаемый телевизором или другой бытовой телевизионной техникой. Спектр бытового абонентского оборудования расширяется и для его подключения предусмотрены различные варианты внутриквартирной разводки.

Если сеть должна иметь систему защиты от несанкционированного доступа со стороны абонентов, то в абонентских точках устанавливаются дополнительные устройства. Наиболее совершенной системой защиты является система адресного контроля абонентов (ACS) в сочетании со скремблированием передаваемых ТВ сигналов. В этом случае у абонента устанавливается устройство, называемое абонентским декодером, которое может преобразовывать сигнал в первоначальную форму по команде с головной станции. На головной станции устанавливаются каналные кодеры, которые через последовательный порт связаны с головным компьютером, управляющим работой системы ACS. Более надежны системы скремблирования на основе цифрового преобразования видеосигнала. По сравнению с ними чисто аналоговые системы, в которых структура самого видеосигнала не затрагивается (выполняется изменение синхроимпульсов или инверсия), гораздо менее стойки к взлому, но более дешевы и теоретически обеспечивают более качественное изображение. Однако, цифровые системы скремблирования, к сожалению, тоже не гарантируют защиты от взлома, и перед оператором лишь стоит выбор: использовать дешевую и ненадежную кодировку или дорогую и несколько более стойкую.

Адресуемость абонентского терминала является очень важной способностью, существенно упрощающей администрирование и контроль сети с головной станции. Оператор может ввести плату за просмотр какого-либо канала или пакета каналов и создать таким образом несколько вариантов обслуживания в сети, здесь играют роль решения и планы менеджмента кабельной сети. Изме-

нить статус любого декодера, т.е. закрыть его за неуплату или открыть или изменить вариант обслуживания, оператор может с минимальными затратами, без выезда технического персонала к абоненту. Адресуемость позволяет предоставить любому абоненту любой вариант обслуживания – от пакетного обслуживания до сложных избирательных вариантов, таких как Pay-Per-View. Некоторые адресуемые абонентские устройства способны поддерживать в сети КТВ другие, “нетелевизионные”, службы, в том числе и требующие передачи информации в обоих направлениях – от головной станции к абоненту и от абонента к головной станции.

Адресуемым абонентским устройством может быть не только декодер, но и активный абонентский ответвитель или делитель. Такое устройство управляется индивидуально с головной станции, умеет принимать с головной станции адресованный именно ему сигнал и выполнять функции включения или отключения абонента, а некоторые модели могут выполнять и декодирование принимаемого сигнала. От обычных ответвителей и делителей эти приборы отличаются тем, что на каждом выходе они имеют электронный ключ, способный по команде разрешить или блокировать прохождение информационного ТВ сигнала с данного выхода на вход абонентского отвода. В корпусе ответвителя находится радиоприемное устройство, настроенное на канал управления, и процессор. Процессор декодирует управляющий сигнал, и если этот сигнал адресован ему формирует сигнал открытия или закрытия определенного выхода ответвителя. Система периодически рассылает управляющие сигналы каждому ответвителю, сообщая ему его текущий статус. Такая система может действовать не только по принципу “все или ничего”, включая или отключая обслуживание абонента, но также позволяет реализовать пакетное обслуживание с помощью нескольких управляющих сигналов.

Глава 20

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

В одной из предыдущих глав говорилось о том, что телевизионная кабельная сеть может использоваться, в том числе, и для предоставления абоненту “нетелевизионных” служб. В настоящей главе рассматривается такую возможность более подробно. Скажем сразу, что те понятия и технологии, о которых здесь пойдет речь, имеют прямое отношение к компьютерным сетям и цифровым технологиям передачи. Поэтому прежде всего нужно сделать небольшое вступление, чтобы объяснить тем читателям, которые не сталкивались в своей практике с компьютерными сетями, что собственно имеется в виду и почему эта глава названа именно так.

Очевидно, что телевизионное изображение, передаваемое по сети кабельного телевидения, является одним из видов информации. Информация – это общее понятие, включающее в себя любые полезные для ее получателя сведения. Способом представления информации являются цифровые и аналоговые сигналы. К аналоговым сигналам относятся обычные телевизионные сигналы, передаваемые по коаксиальным кабельным сетям, о которых говорилось в предыдущих главах, и сигналы эфирного телевидения. К цифровым сигналам относятся сигналы, преобразованные в цифровую форму (оцифрованные потоки видео и звука, факсимильные сообщения) и данные, изначально являющиеся цифровыми (компьютерные файлы, электронная почта, некоторые управляющие сигналы). Однако, в широком смысле, не затрагивая вопросов формирования, любые цифровые сигналы можно считать данными. С точки зрения среды передачи и цифровые и аналоговые сигналы представляют собой лишь электромагнитные колебания (хотя их требования к среде передачи различны). Сама среда не является ни цифровой, ни аналоговой – она лишь обеспечивает физическое соединение двух точек в сети. Канал, напротив, может быть цифровым или аналоговым, поскольку организуется посредством определенного способа модуляции. Таким образом, с помощью одной и той же физической среды (в данном случае телевизионного кабеля) можно организовать как аналоговые каналы, так и цифровые, чтобы передавать наряду с обычными аналоговыми сигналами различные данные. Для абонента это означает, что сеть способна предоставить ему множество услуг. С точки зрения сети в этом случае говорят об интеграции различных служб в рамках одной физической сети. В сфере сетевых технологий распространен термин “мультимедиа”, который означает, что служба сочетает в себе данные сразу нескольких видов. Например, такая служба как видеоконференция подразумевает одновременную передачу видео и звука в реальном времени. Многочисленные службы информационного поиска “по запросу” обеспечивают совместную передачу видео, звука и каких-либо документов в разных комбинациях. Строго говоря, почти все современные службы являются службами с комплексным предоставлением информации, т.е. мультимедийными.

20.1. Связь между герцами, бодами и битами в секунду

Разумеется, сети для передачи данных могут строиться и строятся как отдельные самостоятельные сети с исключительно цифровыми методами передачи. К таковым относятся локальные компьютерные сети, корпоративные (ведомственные) сети и глобальная сеть Интернет. Может возникнуть вопрос – зачем же тогда нужно передавать цифровую информацию по телевизионной кабельной сети. Во-первых, дело в том, что емкость обычного телевизионного кабеля довольно велика (около 1ГГц). Однако, используется она при обычной аналоговой передаче недостаточно эффективно. Грубо говоря, в кабеле остается много свободного места для передачи других служб. Современные методы сжатия цифровых сигналов, такие как MPEG, позволяют поместить в спектр стандартного телеканала сразу несколько цифровых служб. Во-вторых, сети, построенные для аналогового телевидения, представляют собой выгодное решение проблемы доступа абонентов к другим (цифровым) сетям, которая известна в области сетевых технологий под названием “проблемы последней мили”. Действительно, поскольку каждый телевизионный кабель оканчивается в квартире абонента, нет необходимости параллельно строить последнюю милю для цифровой сети. Следовательно, оператор сети КТВ, организуя передачу данных по своему кабелю, решает сразу две задачи – повышает эффективность использования кабеля и привлекает новых клиентов, предоставляя им удобный доступ в другие сети, в частности в сеть Интернет. При этом оператор сети КТВ может самостоятельно предоставлять доступ в Интернет своим абонентам или сдавать свой кабель в аренду оператору цифровой сети (провайдеру).

Другой вопрос, который можно было бы задать, состоит в том, зачем нужно передавать телевизионный сигнал в аналоговом виде, если практически все современные службы рассчитаны на цифровую передачу. Проблема здесь лишь в том, что официальным телевизионным стандартом на сегодняшний день остается аналоговый стандарт, хотя экспериментальное ТВ-вещание в цифровом виде в России уже ведется. В качестве причины можно назвать тот факт, что парк абонентских телевизионных приемников является сегодня в подавляющем большинстве аналоговым.

Теперь, сделав это вступление, разберем все, что было сказано, более подробно. Начнем с очень важного в данном контексте вопроса о соотношении основных характеристик аналоговой и цифровой передачи.

20.1. Связь между герцами, бодами и битами в секунду

Этот вопрос в литературе часто оставляют без внимания, хотя он очень важен для решения двух основных задач, возникающих при расчете характеристик цифрового канала. Во-первых, необходимо понимать, как спектр частот аналогового сигнала пересчитывается в битовую скорость цифрового потока. Во-вторых, нужно знать, как ширина полосы аналогового канала преобразуется в пропускную способность цифрового канала. Первая задача возникает, когда требуется определить скорость, достаточную для передачи сигнала по цифровому каналу. В этой главе предстоит решать вторую задачу, поскольку это необходимо для оценки количества цифровых служб, передачу которых можно обеспечить в полосе частот стандартного телевизионного канала 6 МГц.

Сначала рассмотрим основные характеристики аналоговых и цифровых сигналов. Информационный сигнал, представленный в аналоговом виде, характеризуется, прежде всего, шириной спектра частот (в Гц). Сигнал, представлен-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

ный в цифровом виде, т.е. в виде потока двоичных импульсов или бит (нулей и единиц), характеризуется битовой скоростью (в бит/с). В этой главе не будем останавливаться на определении и расчете битовой скорости, поскольку те данные, которые требуется передать по кабельной телевизионной сети, получаем уже в цифровом виде с известной битовой скоростью. Скажем только, что эта характеристика аналогична ширине спектра для аналогового сигнала. Обе характеристики имеют один и тот же физический смысл – они определяют скорость изменения исходного информационного параметра сигнала.

Теперь рассмотрим показатели, характеризующие канал передачи. Как было сказано ранее, цифровые каналы отличаются от аналоговых видом модуляции. Основной характеристикой аналогового канала является ширина полосы пропускания, которая измеряется (так же, как и ширина спектра аналогового сигнала) в герцах. Очевидно, полоса пропускания аналогового канала связи должна быть больше ширины спектра сигнала на некоторую величину в зависимости от того, какой метод аналоговой модуляции применялся в канале. Например, полоса канала при амплитудной модуляции должна быть в два раза шире спектра информационного сигнала. При частотной модуляции полоса канала должна быть шире в несколько раз.

Цифровой канал имеет две характеристики. Первая аналогична полосе пропускания аналогового канала и называется символьной скоростью. В зависимости от вида канала ее измеряют в бодах или в символах в секунду. Те и другие единицы измерения имеют один и тот же смысл – это количество тактовых интервалов несущего периодического сигнала, которое формирует цифровой передатчик в секунду. Тактовым интервалом называют интервал времени, в течение которого передается одно значение информационного параметра (оно называется символом). Следовательно, символьная скорость – это количество значений информационного параметра (символов), которое способен производить передатчик в секунду. Все множество символов строго определяется для конкретного метода цифровой модуляции. Символьную скорость также можно назвать цифровой несущей или тактовой частотой работы передатчика. Очевидно, эта частота не может быть больше рабочей полосы частот канала. Поэтому обычно символьную скорость по абсолютному значению просто принимают равной ширине полосы пропускания аналогового канала (хотя реально она чуть меньше из-за того, что несущая не может находиться на самой границе полосы).

Второй характеристикой цифрового канала является его пропускная способность. Она определяется как максимальная скорость передачи битового потока, которую способен обеспечить данный канал при выбранном способе модуляции. Измеряется она (так же, как и скорость передачи цифрового сигнала) в битах в секунду. Понятно, что пропускная способность канала должна быть равна или больше, чем требуемая для передачи цифрового сигнала битовая скорость. Подчеркнем, что пропускная способность канала зависит от используемого в канале способа цифровой модуляции, поскольку именно способ модуляции определяет количество бит, передаваемых как один символ в одном тактовом интервале. Следовательно, целью цифровой модуляции является (кроме преобразования сигнала для передачи по каналу) увеличение пропускной способности цифрового канала при той же символьной скорости. Обязательным условием при этом является хорошая распознаваемость отдельных символов на приеме.

Поэтому, когда говорят о символьной скорости канала, имеют в виду скорость передачи цифрового потока, но безотносительно к какому-либо виду модуляции. Когда же говорят о пропускной способности канала в бит/с, подразумевают, что в нем для передачи цифрового потока использовался конкретный способ модуляции. Пропускную способность зачастую называют скоростью передачи.

На практике используются два класса методов цифровой модуляции. К первому относится собственно модуляция, когда символы передаются с помощью синусоидальных несущих сигналов (в этом случае для измерения символьной скорости обычно используют боды), а ко второму – методы импульсного кодирования, когда символы передаются непосредственно в виде прямоугольных импульсов с определенной тактовой частотой (обычно используют симв/с). Тех и других методов существует множество. Наиболее распространенными методами модуляции являются квадратурно-амплитудная модуляция (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) и квадратурно-фазовая манипуляция (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), а примерами кодирования являются методы 2B1Q и NRZ. Выбор метода модуляции диктуется как скоростными требованиями самой службы, передачу которой нужно обеспечить, так и помехозащитными свойствами среды передачи. Импульсное кодирование применяется на каналах высокого качества, а модуляция предпочтительна в том случае, когда канал вносит сильные искажения в передаваемый сигнал. Цифровую модуляцию часто называют кодированием линии или линейным кодированием.

Напомним, что перед нами стоит следующая задача – оценить количество цифровых сигналов, передачу которых можно обеспечить в полосе частот 6 МГц стандартного телевизионного канала, при том, что каждый цифровой сигнал характеризуется некоторой битовой скоростью передачи. Для этого нужно найти пропускную способность канала в бит/с для конкретного способа модуляции, чтобы затем соизмерить ее с известными битовыми скоростями цифровых потоков данных.

Следующее соотношение, которое установил Клод Шеннон, определяет связь между пропускной способностью канала и его рабочей полосой частот (или символьной скоростью):

$$C = F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right),$$

где C – пропускная способность канала (бит/с); F – полоса пропускания канала, Гц; P_c – мощность сигнала, $P_{ш}$ – мощность шума.

Согласно формуле Шеннона, пропускную способность канала с фиксированной полосой можно неограниченно повышать за счет повышения мощности передатчика и уменьшения мощности шума. Однако, эта формула является скорее теоретической, поскольку она не учитывает способа модуляции и не раскрывает ее сути. Для инженерного расчета необходимо прямое соотношение между символьной скоростью и количеством бит, передаваемых в секунду. Поэтому, на практике пропускная способность рассчитывается с помощью следующего соотношения:

$$C = B \cdot \log_2 M,$$

где C – пропускная способность канала, бит/с; B – символьная скорость в канале, симв/с; M – количество символов в данном методе модуляции (количество эффективных состояний сигнала).

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

Эта формула применима для инженерных расчетов, поскольку она отражает суть цифровых методов модуляции. При модуляции цифрового потока отдельные его биты объединяются в символы (парами, тройками, четверками и т.д.), поэтому количество символов может быть равным 2^k ($k=2, 3, 4, \dots$). Сами биты, заметим, тоже являются символами, но простейшими, т.е. двоичными ($k=1$). Затем каждый символ передается с помощью отдельного состояния несущего сигнала. Причем, эти состояния в разных методах представляются по-разному: под состоянием может пониматься уровень сигнала (так реализован код 2B1Q), перепад уровня (манчестерский код), фаза сигнала (QPSK) или комбинация уровня и фазы (QAM), т.е. любые информативные параметры. Количество возможных состояний сигнала, используемых для передачи символов, в разных методах различно (иногда оно обозначается в названии метода). Например, в QAM-32 возможны 32 состояния, которые образованы комбинациями 8 значений фазы и 4 значений амплитуды несущего колебания. В QAM-64 возможны 64 состояния, которые образованы комбинациями 8 значений фазы и 8 значений амплитуды. В коде 2B1Q возможны 4 состояния, которые соответствуют четырем значениям уровня импульса. Таким образом, после цифровой модуляции получаем сигнал, имеющий уже не два различимых эффективных состояния, а более (4, 32, 64 и т.д.), т.е., способный передать такое же количество различных символов. Символьная скорость, соответственно, равна числу состояний несущей в единицу времени. Очевидно, чем большее число состояний сигнала используется в данном методе модуляции, тем большую битовую скорость этот метод позволяет получить в канале.

Кажется, что увеличивая количество используемых состояний сигнала, можно получить сколь угодно большую пропускную способность. Но на практике возможное количество состояний ограничено влиянием шума в канале, поскольку, если амплитуда шума станет превышать разность между соседними уровнями, то приемник не сможет устойчиво распознавать передаваемые данные. Следовательно, чем более информативен метод модуляции, тем сильнее он подвержен влиянию помех в канале. Хотя в расчетной формуле наличие шума не учитывается явно, его влияние отражается в выборе количества состояний сигнала, и данная формула по своему физическому смыслу соответствует формуле Шеннона. Чтобы уменьшить количество неправильно декодированных бит, используют различные варианты помехозащитного кодирования, которые основаны на добавлении в передаваемый цифровой сигнал избыточных бит. Пропускная способность канала при этом остается той же, поэтому скорость передачи полезной информации уменьшается.

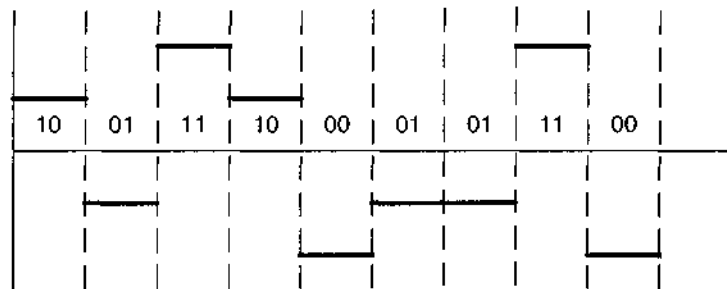
Из формулы видно, что пропускная способность (битовая скорость) может быть больше символьной скорости, меньше ее и равна ей. Эти ситуации иллюстрирует рис. 20.1. Например, при модуляции единичного значения бита импульсом положительной полярности, а нулевого значения – импульсом отрицательной полярности, каждый бит передается одним состоянием сигнала. В этом случае символ тождественен биту, несущий сигнал имеет два различных эффективных состояния ($M=2$), а пропускная способность канала будет равна его символьной скорости. Так реализован код NRZ (потенциальный код без возвращения к нулю). Но возможна и такая ситуация, когда сигнал дважды изменяет свое состояние при передаче каждого бита. Так построен биполярный импульсный код, в котором используется три различных состояния сигнала (положительный уровень, отрицательный уровень и нулевой), но каждый сим-

20.1. Связь между герцами, бодами и битами в секунду

вол передается двумя состояниями. Следовательно, эффективное число состояний в этом случае равно 1,5 ($M = 3/2$) и пропускная способность канала будет почти в два раза ниже его символьной скорости. Однако на практике такие низкоскоростные методы модуляции обычно не применяются. Количество состояний сигнала, как правило, более двух и каждое состояние используется для передачи одного символа.



Битовая скорость равна символьной скорости



Битовая скорость в два раза больше символьной скорости

Рис. 20.1. Битовая скорость и символьная скорость

Теперь становится понятно, каким образом способ модуляции определяет количество бит, передаваемых одним символом. Количество бит в символе n однозначно связано с количеством символов M соотношением $n = \log_2 M$. Двоичный логарифм здесь показывает, что M является степенью числа 2. Т.е., приведенная выше формула означает, что битовая скорость передачи потока в канале равна произведению символьной скорости в канале и количества бит, передаваемых одним символом. Например, модем, работающий в канале тональной частоты (полоса 3,4 КГц) при символьной скорости 2400 Бод и поддерживающий кодирование 4096 символов, обеспечивает передачу цифрового потока с битовой скоростью 28,8 Кбит/с, поскольку $\log_2 4096 = 12$, а далее нетрудно подсчитать, что $2400 \text{ симв/с} \times 12 \text{ бит/симв} = 28\,800 \text{ бит/с}$.

Здесь следует сделать небольшое примечание. Пропускная способность каналов связи, а также коммуникационного оборудования цифровых сетей, традиционно измеряется в битах в секунду, а не в байтах в секунду. Это связано с тем, что данные в сети передаются последовательно (побитно), а не парал-

тельно (байтами), как это происходит между устройствами внутри компьютера. Поэтому, такие единицы измерения, как килобит, мегабит или гигабит, в сетевых технологиях строго соответствуют степеням числа 10 (килобит = 1000 бит, мегабит = 10^6 бит и т.д.), а не близким к этим числам степеням 2, как это принято для компьютерных данных (где приставка "кило" означает $1024 = 2^{10}$, а "мега" означает $1048576 = 2^{20}$).

Возвращаясь к нашей задаче, получаем, что максимальная символьная скорость, которую можно получить в канале кабельного ТВ на 6 МГц, равна 6 МБод (на практике он ближе к 5 МБод). Если используется QAM-64 ($64 = 2^6$), то теоретический предел пропускной способности такого канала будет равен произведению 6 МБод и 6 бит/симв, т.е. составит 36 Мбит/с. Это очень значительная величина, особенно для домашних применений. Чтобы оценить ее, можно сказать, что, например, для передачи видеопотока в формате MPEG-2 с качеством, соответствующим качеству изображения на экране бытового телевизора, достаточно 6 Мбит/с. Поэтому канал на 36 Мбит/с способен поддерживать любую мыслимую информационную услугу, и при этом еще останется место для поддержки видеоконференции и одного-двух каналов видео по запросу.

20.2. Сети передачи данных

Если хотим использовать сеть КТВ в качестве среды для передачи данных, ее нельзя рассматривать в отрыве от сетевых стандартов и технологий, применяемых в цифровой сети передачи данных, поскольку она становится в этом случае частью цифровой сети. Тем самым, технологии цифровых сетей переносятся на сеть КТВ, поэтому необходимо хотя бы в общих чертах представлять себе принципы построения, функционирования и особенности сети передачи данных.

Конечным обслуживаемым прибором в сети передачи данных является компьютер. Отдельные компьютеры обычно объединяются в группы, называемые локальными вычислительными сетями (ЛВС). Компьютер, наделенный в локальной сети какими-либо особыми полномочиями или функциями (управления, хранения данных, предоставления ресурсов, предоставления услуг) называется сервером локальной сети. Сервер обладает, как правило, более мощными ресурсами и большой производительностью. Остальные компьютеры в локальной сети являются подчиненными по отношению к серверу и называются клиентами. Однако, некоторые компьютеры могут сочетать в себе функции клиента и сервера. Локальная сеть, в которой между компьютерами четко разделены функции клиентов и сервера, называется двухранговой. Сеть, в которой все компьютеры равноправны, называется одноранговой.

Большая цифровая сеть передачи данных строится во многом по иным принципам, чем сеть кабельного телевидения. Прежде всего, существуют серьезные различия в архитектуре. Основу сети передачи данных составляют магистральные линии передачи, к которым в определенных точках (узлах сети) с помощью магистральных коммутаторов или маршрутизаторов, подключается множество линий более низкого ранга. К этим линиям, в свою очередь, также с помощью коммутаторов или маршрутизаторов по цифровым каналам связи подключаются абоненты сети. Каналы, предоставляющие абонентам доступ к узлам связи, имеют в обратном направлении (от абонента) более низкую пропускную способность, чем магистральные каналы, иначе сеть бы не справилась

с потоками данных своих многочисленных пользователей. Абонентами сети могут быть как отдельные компьютеры, так и локальные сети, состоящие из нескольких компьютеров. Поток данных локальной сети собирается каким-либо коммуникационным устройством, тип которого зависит от способа структуризации локальных сегментов данной сети. Коммуникационное устройство выполняет, в основном, две функции – замыкает на себя (или, как говорят, локализует) трафик данного сегмента и соединяет его с другими сегментами сети.

Доступ к цифровым сетям основан на принципе адресации, который состоит в том, что каждый компьютер в сети имеет свой уникальный номер (адрес). Этот адрес передается по сети вместе с данными, так что каждый компьютер в сети “знает”, какие данные ему предназначены. Адрес имеет иерархическую структуру, удобную для построения больших сетей. Таким образом, передача данных по сети сводится к выполнению коммуникационными узлами функции перенаправления пакета данных в зависимости от его адреса по нужному пути. Эта функция называется на разных уровнях сетевой модели коммутацией или маршрутизацией данных.

Важной характеристикой цифровой сети является структуризация ее локальных сегментов (сегментация), определяющая способ объединения компьютеров в сегмент. Различают физическую и логическую сегментацию. При попытке подключения большого числа компьютеров к одной сети возникают ограничения физического характера, связанные с ухудшением качества сигнала. Для преодоления этих ограничений большая сеть разбивается на физические сегменты с помощью устройств, называемых хабами или концентраторами. Это позволяет наращивать общую протяженность сети и количество компьютеров в ней путем улучшения качества передаваемого сигнала (восстановления его уровня, формы импульсов) в концентраторе. Кроме этого, физическая сегментация повышает надежность сети, поскольку если в случае сбоя какой-то компьютер в сети начинает непрерывно передавать свои данные, то концентратор может отключить его от сети. При соединении физических сегментов в единую сеть передачи данных появляется задача организации эффективного взаимодействия между разными сегментами (с наибольшей скоростью и надежностью) и главным аспектом этой проблемы оказывается оптимальное распределение трафика между сегментами. Дело здесь в том, что интенсивность информационного обмена компьютеров по разным маршрутам сети неоднородна и как правило не согласуется с физической сегментацией сети, вследствие чего сеть обрабатывает избыточные потоки и общая производительность снижается. Решением является разбиение сети на логические сегменты. Идея логической сегментации состоит в том, чтобы основная часть трафика каждого логического сегмента не выходила за его пределы. Для этого в логический сегмент объединяются те компьютеры, интенсивность обмена между которыми максимальна. В общем случае логические сегменты сети не соответствуют ее физическим сегментам. Например, концентратор Ethernet может поддерживать в сегменте физическую топологию “звезда”, тогда как логической топологией остается “общая шина”. Концентратор меняет только физическую топологию сети, но при этом не меняет ее логической конфигурации. С целью логической сегментации применяется целый ряд коммуникационных устройств – коммутаторы, мосты, маршрутизаторы. Конечно, объединить сегменты можно и не прибегая к логической структуризации, однако, за счет этого значительно повышается пропускная способность и управляемость сети. Крупные сети практически никогда не строятся без логической структуризации.

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

От способа сегментации зависит порядок доступа к среде передачи в данном сегменте. По порядку доступа среда передачи может быть индивидуальной или разделяемой. Индивидуальной средой передачи является линия связи, к каждому окончанию которой подключено только одно устройство. Устройство единолично владеет линией все время и получает всю ее пропускную способность в свое распоряжение. Например, в топологии "звезда" каждый компьютер связан с центральным узлом по индивидуальной линии. Сеть с полносвязной топологией, где каждый компьютер связан с каждым, также представляет собой индивидуальную среду. Единственным недостатком такой структуры является ее неэкономичность. Разделяемой средой передачи (shared media) называется линия, которая используется попеременно несколькими (более чем двумя) устройствами, подключенными к ней. В системе с разделяемой средой ни один из компьютеров не может постоянно использовать линию. В каждый момент времени только один компьютер имеет право передавать данные в линию, так как в случае одновременной передачи несколькими компьютерами сигналы будут смешиваться и искажаться.

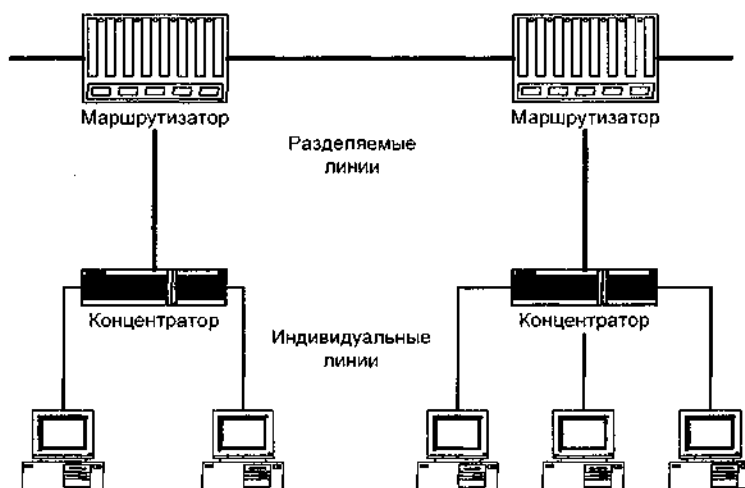


Рис. 20.2. Индивидуальная и разделяемая среды

На рис. 20.2 показан пример построения сети, на разных участках которой для подключения компьютеров используется индивидуальная и разделяемая среда. Примерами связи компьютеров посредством разделяемой среды являются системы с топологией "общая шина" и "кольцо". В связи с совместным использованием разделяемых линий возникают проблемы, как электрического характера (обеспечение нужного уровня сигнала при подключении к одному кабелю нескольких приемников и передатчиков), так и логического характера (разделение доступа к кабелю во времени между всеми устройствами). Система с разделяемой средой при увеличении количества подключенных к ней компьютеров будет работать все медленнее, поскольку пропускная способность линии делится между всеми компьютерами. Т.е. в этом случае за экономичность структуры локального сегмента приходится расплачиваться его производительностью. Несмотря на эти проблемы, подключение к сети посредством

разделяемой среды применяется очень часто. Этот подход реализован в широко распространенных классических технологиях Ethernet (для общей шины) и Token Ring (для кольца).

Правила доступа устройств к совместно используемой среде передачи в локальной сети устанавливаются специальными протоколами контроля доступа к среде на канальном уровне, которые называются MAC-протоколами (Media Access Control). Протоколы MAC разрабатываются с учетом архитектуры локальных сетей и применяемых в них технологий передачи. В любой локальной сети каждое устройство имеет MAC-адрес, также называемый машинным адресом. Он представляет собой уникальный номер данного устройства в сети и состоит из 6 байт, из которых первые 3 байта являются идентификатором производителя данного устройства, а вторые 3 байта обозначают номер изделия.

Важное отличие сетей передачи данных от телевизионных кабельных сетей заключается в том, что первые обязаны быть интерактивными, т.е. поддерживать передачу данных в обоих направлениях – в прямом направлении из сети к абоненту (downstream) и в обратном направлении от абонента в сеть (upstream). Сети КТВ не обязаны работать в интерактивном режиме, хотя, как видно из предыдущих глав, они могут обладать такой способностью (для этого необходимо иметь передающее и усилительное оборудование прямого и обратного канала). Более того, считается, что современное телевидение – это прежде всего интерактивное телевидение. Поэтому будем рассматривать нашу сеть КТВ как сеть с обратным каналом.

Кроме архитектурных различий имеется ряд различий, связанных со спецификой передаваемой информации. Существенная особенность сетей передачи данных состоит в том, что данным, которые в отличие от телевизионного сигнала представляют собой в основном конфиденциальную информацию, необходима защита от просмотра посторонними лицами. Забегая вперед, скажем, что система с индивидуальными соединениями обеспечивает лучшую защиту информации, нежели система с разделяемой средой передачи.

Передача информации в цифровых сетях характеризуется показателями качества обслуживания QoS (Quality of Service). К показателям QoS относятся скорость передачи информации, вероятность ошибочной передачи, временная задержка между передачей и приемом информации, а также дисперсия времени задержки. Под гарантированным качеством услуг понимается управляемость этих показателей со стороны оператора при предоставлении абоненту услуг связи. Различные тарифные планы, предлагаемые оператором, гарантируют обеспечение разных уровней качества услуг.

Цифровые сети передачи данных отличаются от сетей КТВ также и тем, что они имеют сложный встроенный механизм управления передаваемыми потоками данных. Этот механизм реализуется посредством специального сетевого протокола, согласно которому в сети генерируется и передается управляющая информация. Наиболее распространен протокол SNMP (Simple Network Management Protocol).

Наконец, главной в рассмотрении особенностью сетей передачи данных является огромная разница скоростей передачи в магистральной и абонентской линии. Абонентской линией называется участок от абонента до первого коммутатора в сети (или до первого узла связи), т.е. та линия, с помощью которой дома, отели и небольшие компании подключаются к ближайшей точке доступа в сеть. В сфере сетевых технологий этот участок также называется "последней

милей". Магистральные участки сети должны иметь очень большую пропускную способность, измеряемую гигабитами в секунду, и современные технологии передачи и коммутации данных позволяют получить на магистралях практически любую необходимую пропускную способность по разумной цене. Однако, обеспечение высоких скоростей передачи в линии абонентского доступа пока остается проблемой. Таким образом, получается, что сеть способна предоставить абоненту в единицу времени огромный поток данных, но абонент не может их принять с той же скоростью. За последние годы было предложено множество решений этой проблемы и многого удалось добиться, но до конца задача еще не решена. Заметим, что эта проблема носит не технический, а экономический характер. Основная трудность здесь заключается в том, чтобы обеспечить относительно дешевый доступ в сеть для массового клиента. Для этого нужна разветвленная сетевая инфраструктура, охватывающая большую часть домов городской застройки.

Технология Ethernet

Рассмотрим одну из наиболее распространенных технологий, применяемых для передачи данных в цифровых сетях с разделяемой средой передачи. Характеристики технологии Ethernet определяются стандартом IEEE 802.3, который содержит несколько спецификаций, разработанных для разных типов кабеля. Протокол канального уровня MAC в этой технологии реализован по принципу случайного множественного доступа к разделяемой среде с обнаружением коллизий CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Это означает, что в тот момент, когда среда свободна, каждый компьютер в сегменте может захватить ее на определенный промежуток времени для передачи своих данных. Скорость, с которой компьютеры могут передавать данные, является пропускной способностью (производительностью) локальной сети Ethernet. Управление доступом в сеть, т.е. захватом среды, осуществляется специальными устройствами – сетевыми адаптерами NIC (Network Interface Card), установленными на каждом компьютере. На случай попытки захвата среды сразу несколькими компьютерами в сегменте Ethernet предусмотрен специальный алгоритм обнаружения и разрешения коллизий. Прием данных организован следующим образом. При попадании пакета данных в общую среду передачи все сетевые адаптеры одновременно начинают анализировать этот пакет на предмет совпадения содержащегося в нем адреса с их собственными адресами. В случае совпадения адаптер компьютера-адресата записывает пакет данных в свою память. Конфликтов между компьютерами при этом не происходит. Особенностью технологии Ethernet является то, что подключать компьютеры можно и без использования концентратора – напрямую к общей линии передачи.

Первый стандарт Ethernet был принят в 1982 году. Он был рассчитан на скорость передачи до 10 Мбит/с. В качестве среды передачи Ethernet могла использоваться любая линия – тонкий или толстый коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно и радиолиния. В начале 90-х годов стала ощущаться нехватка пропускной способности 10 Мбит/с и новый стандарт Fast Ethernet, принятый в 1995 году, уже обеспечивал передачу со скоростью 100 Мбит/с. Однако, этот стандарт не разрешал использование коаксиального кабеля в качестве среды передачи, а был ориентирован только на витые пары и оптоволокно. В 1999 г. был разработан следующий стандарт Gigabit Ethernet, поддерживающий ско-

рость 1 Гбит/с, в котором, кроме витой пары и оптоволокна, было разрешено использование специального твинаксимального кабеля (*twinaх*) с волновым сопротивлением 150 Ом. Число сетей, построенных по технологии Ethernet, к настоящему моменту оценивается в 5 миллионов, а количество компьютеров, работающих в таких сетях – в 50 миллионов. Достоинствами технологии Ethernet являются простота, экономичность и легкость подключения к сети новых компьютеров.

20.3. Методы абонентского доступа

На сегодняшний день в сетевой индустрии применяется несколько способов абонентского доступа к высокоскоростным сетям передачи данных. Использование ответвлений телевизионной кабельной сети, подключаемых к цифровой сети с помощью так называемых кабельных модемов, является одним из возможных решений. Далее обсудим его подробно, а пока рассмотрим другие, конкурирующие, технологии доступа, ориентированные на массового клиента, и являющиеся альтернативами доступу по сети КТВ, чтобы оценить их достоинства и недостатки.

Первым и самым распространенным решением проблемы “последней мили” оказалось использование кабельной инфраструктуры общественной телефонной сети. Не будем рассказывать об организации телефонных сетей, поскольку этой теме посвящена специальная литература. Отметим лишь главное: их основным достоинством является их практически повсеместное распространение, а серьезным недостатком – качественные характеристики. Телефонная сеть создавалась для передачи аналоговых сигналов в полосе от 300 до 3400 Гц. Наиболее часто для передачи данных по телефонному каналу используются модемы стандарта V.34, работающие на скоростях до 33,6 Кбит/с. В конце 1996 года была предложена модемная технология “56К” (стандарт V.90), основанная на передаче цифровых сигналов по обычному телефонному каналу. Она позволяет абоненту лишь принимать информацию со скоростью до 56 Кбит/с (скорость передачи остается прежней – 33,6 Кбит/с), но это возможно только при наличии цифровых каналов (ИКМ) между АТС абонента и цифровой АТС провайдера, что означает необходимость модернизации районных АТС. Учитывая качество отечественных телефонных сетей, нужно констатировать, что эта скорость достигается не всегда. Решающую роль играют характеристики абонентской линии – ее длина, затухание, частотная характеристика, высокие переходные помехи от соседних телефонных пар. Притом, что выигрыш по скорости относительно V.34 кажется не столь большим, технология “56К” почти достигает теоретического предела Шеннона, поэтому далее повышать скорость передачи по аналоговым линиям невозможно. И даже такая скорость не позволяет предоставить абоненту доступ ко многим видам услуг, обеспечиваемых современными сетями передачи данных.

Другим решением стало использование цифровых абонентских линий DSL (*Digital Subscriber Line*). Появилось целое семейство технологий xDSL, среди которых высокоскоростная цифровая абонентская линия HDSL (*High data rate Digital Subscriber Line*), симметричная цифровая линия на одной физической паре SDSL (*Single line Digital Subscriber Line*), асимметричная цифровая абонентская линия ADSL (*Asymmetric data rate Digital Subscriber Line*), асимметричная сверхвысокоскоростная цифровая абонентская линия VDSL (*Very High bit*

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

rate Digital Subscriber Line) и некоторые другие разновидности. Различные представители этого семейства способны обеспечить разную дальность действия и разную скорость передачи, и, вследствие этого, имеют различные сферы применения. Линии DSL являются многофункциональными и могут быть использованы не только для организации высокоскоростного доступа, но также для передачи телефонных сигналов, стыковки фрагментов сетей передачи данных, объединения локальных сетей, подключения базовых станций сотовых сетей связи или подключения УАТС к городским телефонным сетям. Сейчас они активно применяются в корпоративных и общественных сетях.

Первым на телекоммуникационном рынке появилось оборудование на основе технологии HDSL. Линия HDSL организуется с помощью двух пар медных жил и обеспечивает в обоих направлениях (прямом и обратном) одинаковые скорости передачи, не превышающие 2 Мбит/с. Дальность связи составляет 5 – 6 км. Технология SDSL обеспечивает в обоих направлениях те же скорости 2 Мбит/с, но по одной медной паре и практически на тех же расстояниях, поэтому сейчас оборудование HDSL вытесняется устройствами SDSL. Наиболее перспективной является технология ADSL, так как область ее применения гораздо шире, чем у HDSL и SDSL. Благодаря заложенной в ней асимметричности, эта технология идеально подходит для подключения к Интернет и применения в других системах типа клиент-сервер. Асимметричной линия ADSL называется потому, что она поддерживает разные скорости в разных направлениях передачи: до 8 Мбит/с в прямом направлении и до 1 Мбит/с в обратном направлении. Эта линия способна обеспечить связь на расстоянии до 5,5 км. Технология VDSL является сверхвысокоскоростной разновидностью ADSL и поддерживает прямую передачу со скоростью до 52 Мбит/с, а обратную передачу со скоростью до 2 Мбит/с. Правда, в отличие от других членов семейства, она способна работать лишь на малых расстояниях (менее 500 м). Сферой ее применения могут быть абонентские участки комбинированных сетей “медь-оптоволокно”, расположенные в пределах одного здания.

Пропускная способность линий DSL снижается с увеличением расстояния и вследствие дефектов кабелей. Однако, пропускная способность и дальность действия линий xDSL во многом определяются используемыми методами линейного кодирования. В устройствах HDSL применяется метод 2B1Q (каждое модуляционное изменение несет 2 бита информации). При таком способе модулированный сигнал обладает широким спектром. Высокочастотные составляющие спектра при передаче по медной паре ослабляются значительно сильнее и гораздо чувствительнее к помехам, чем низкочастотные. В условиях города помехи могут создавать, например, работающие электродвигатели, проезжающие трамваи, электросварка и другие электрические устройства. Более узкий спектр имеет сигнал, модулированный по методу CAP (Carrierless Amplitude-Phase), т.е. амплитудно-фазовая модуляция с подавленной несущей. Существуют две ее разновидности – CAP64 (каждое модуляционное изменение несет 6 бит информации) и CAP128 (7 бит в каждом изменении). В отличие от 2B1Q, этот вид модуляции не чувствителен к высокочастотным помехам. В последнее время все чаще применяется метод DMT (Discrete MultiTone), который описан в стандартах ANSI T1.413 и ITU-T G.922.2. Если при модуляции CAP используется одна несущая частота, то в DMT формируется сразу 256 несущих с шагом в 4 кГц.

Несомненным преимуществом линий DSL, кроме высокого качества связи и высокой скорости передачи, является то, что это прямые соединения, а не коммутируемые, как в случае телефонных каналов. Поэтому, в отличие от аналоговых модемов, задержка на установление соединения с помощью DSL-модема отсутствует. Ввиду того, что сеть абонентских линий DSL построена по топологии "звезда", при которой каждый канал имеет только две конечные точки, абонент получает канал полностью в свое распоряжение. Такое соединение по своей природе более защищено, нежели система с разделяемой средой передачи, каковой является телевизионная кабельная сеть. Конечно, принципиальная возможность прослушивания линии DSL по-прежнему сохраняется, но для этого злоумышленнику потребуются специализированное устройство, потому что два обычных DSL-модема не могут сосуществовать на одной линии.

Существуют и технологии беспроводного абонентского доступа, которые применяются в качестве дополнения к существующим сетям и позволяют быстро развертывать системы связи. Организация сети на базе беспроводных линий подобна структуре кабельной сети. Основное отличие заключается в том, что сигнал цифровых данных (например, содержащий запрошенную из сети Интернет информацию), модулируется в радиочастотный канал, по которому осуществляется передача на антенну, установленную на здании пользователя. От антенны коаксиальный кабель идет к конвертеру, который преобразует сигнал из СВЧ-диапазона в частотный диапазон кабельного телевидения. После этого сигнал поступает на модем, расположенный в помещении пользователя. Модем демодулирует входящий сигнал данных и направляет его на персональный компьютер или на ЛВС. Одной из перспективных технологий беспроводного доступа для индивидуальных пользователей является относительно недавно появившаяся многоканальная многопользовательская распределительная служба MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service). Первоначально она предназначалась для доставки видеосигналов в диапазоне 2,4 ГГц в системах с взаимоисключающим названием – "беспроводный кабель". Некоторые операторы MMDS уже предлагают широкополосный доступ в Интернет, но пока единственным обратным каналом остается обычная телефонная линия.

В настоящее время несколько сервис-провайдеров в России занимаются организацией двусторонних широкополосных информационных услуг по MMDS. Между тем, специфика этого метода такова, что в условиях сильного дождя и снега доступ по MMDS оказывается невозможным. Серьезно осложнить прием могут также искажения, обусловленные многолучевым распространением, являющимся результатом отражения сигнала от зданий и других объектов. Следует учитывать и расстояние, так как сигналы беспроводной связи могут приниматься только в пределах определенного расстояния от передатчика, и к тому же непременным требованием является прямая видимость передающей станции из точки расположения приемной абонентской антенны. Решением этой проблемы может быть установка ретрансляторов по всей зоне обслуживания по принципу сотовой связи.

Другой технологией беспроводного доступа, также ориентированной на массового потребителя, является локальная многопользовательская распределительная служба LMDS (Local Multipoint Distribution Service). Она представляет собой сотовую технологию, предполагающую установку приемопередатчиков и антенн по всей обслуживаемой области. Работает она в диапазоне до 28 ГГц. На таких высоких частотах спектр достаточно широк для предоставления ши-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

рокопосных услуг индивидуальным абонентам. Однако процесс внедрения LMDS еще только начался и пока слишком рано говорить о том, каковы шансы LMDS стать конкурентоспособной высокоскоростной службой.

Существует также технология беспроводного доступа на основе спутниковых каналов. Привлекательность спутниковых систем в плане предоставления услуг передачи данных обусловлена некоторыми их особенностями, позволяющими обойти затруднения, которые возникают в наземных системах передачи данных. Зона охвата спутника такова, что он может обслуживать очень большое количество абонентов, а стоимость организации обслуживания совершенно не зависит от географического положения пользователя в пределах зоны охвата спутника и условий местности. Однако, спутниковые системы доступа имеют не самую высокую скорость передачи данных (порядка 400 Кбит/с по направлению к пользователю) и работают со значительными задержками. Сигнал запроса передается с помощью обычного телефонного модема, проходит по телефонной линии, через провайдера и далее по тракту сети Интернет, а ответный сигнал передается через спутник, проходя в общей сложности около 70 тысяч километров. Очевидно, такое средство доступа является достаточно медленным, что особенно заметно при организации двусторонней связи в режиме реального времени. Вложения в системы спутниковой связи составляют многие миллиарды долларов, хотя успех и получение прибыли совершенно не гарантированы.

Подведем итог сказанному о возможных методах абонентского доступа. Существует четыре главных претендента на предоставление широкополосных информационных услуг индивидуальным абонентам и небольшим компаниям: сети кабельного телевидения, аналоговые телефонные линии, цифровые абонентские линии и беспроводные службы. Эти технологии отличаются друг от друга архитектурой, пропускной способностью, надежностью защиты и управляемостью. Названные различия, в свою очередь, определяют затраты на строительство для сервис-провайдеров и стоимость услуг для абонентов.

Доступ по аналоговым каналам телефонной сети является самым дешевым и потому, вероятно, самым используемым в настоящее время методом. Этому способствует повсеместное проникновение телефонных сетей, к которым подключены почти все квартиры городских домов. Однако, существующая телефонная сеть на сегодня практически морально устарела и работает на пределе своих возможностей. Ресурсы ее пропускной способности и качества передачи принципиально ограничены и она не способна предоставлять абонентам новые современные услуги, рассчитанные на высокоскоростную цифровую передачу. Медленный и некачественный доступ в Интернет уже сейчас не устраивает большинство абонентов. Тенденция к отказу от аналоговых телефонных сетей очевидна, а отпущенный им срок составляет не более 10 лет.

Методы беспроводного доступа в российских условиях пока не получили широкого распространения и не могут считаться массовым, поэтому они, скорее всего, не составят конкуренции трем остальным методам. Хотя на тех значительных территориях России, которые вообще не имеют каких-либо проводных систем связи, организация беспроводного доступа, пожалуй, могла бы стать хорошим выходом из ситуации.

Таким образом, двумя главными конкурентами в сфере предоставления высокоскоростного абонентского доступа в ближайшее время будут оставаться DSL-линии и гибридные коаксиально-оптические системы кабельного ТВ. Обе

эти технологии способны предоставить массовому потребителю услуг связи канал высокого качества со скоростью передачи более 10 Мбит/с. Технологии DSL имеют громадный потенциал в плане предоставления высокоскоростного доступа, однако, серьезным сдерживающим фактором на пути их широкого распространения является относительно высокая стоимость. Телевизионные кабельные сети, наоборот, становятся в последнее время все более массовыми. Практически каждый новый многоквартирный дом сейчас оснащается такой сетью. Большое распространение получили системы кабельного телевидения, как масштаба микрорайона, так и охватывающие целые города. Такая ситуация сложилась не только в России. Если обратиться к фактам, то в мире кабельные модемы пока имеют больше частных пользователей, чем технология ADSL. Например, по данным на конец 1998 года число пользователей кабельных модемов в США было равно 630 000 в сравнении с 21 000 пользователей с доступом по ADSL. К середине 1999 года по всему миру использовалось для высокоскоростной передачи данных около 1,3 миллиона кабельных модемов, 1 миллион из которых находился на территории США. По оценкам компании Pioneer Consulting (Кембридж, штат Массачусетс) к 2003 году по всему миру может насчитываться 20 миллионов пользователей кабельных модемов, причем Европа с 7 миллионами пользователей должна обогнать Соединенные Штаты, на территории которых число пользователей на 2003 год оценивается суммой в 6 миллионов.

Успешное внедрение более дешевых и совершенных вариантов DSL вероятно приведет к более быстрому росту их популярности в течение ближайших нескольких лет, хотя продолжающиеся инвестиции в операторов КТВ, в свою очередь, могут также ускорить распространение кабельных модемов. Стоит заметить, что такие серьезные западные корпорации как Microsoft, Intel и AT&T вкладывают большие средства в кабельные компании. Местные операторы цифровой связи и операторы кабельного ТВ имеют возможность постепенно расширять свои оптические сети до домов абонентов. С уменьшением протяженности последнего отрезка медного кабеля потенциал доставки высокоскоростных данных будет возрастать. Разумеется, наилучшим решением всех проблем стал бы полный отказ от использования на абонентском участке медных кабелей и подведение прямо к домам волоконно-оптических кабелей, которые способны интегрировать любые возможные виды трафика. Но пока не только в России, но и более развитых странах трудно найти примеры организации доступа на базе оптики для массового клиента. В соответствии с прогнозами это должно произойти через 20 – 25 лет.

20.4. Особенности использования сетей КТВ для передачи данных

Кабельное телевидение появилось как способ доставки десятков, а затем сотен аналоговых телеканалов в квартиры и дома. Бум сетей кабельного ТВ произошел в США в середине 1980-х годов. На этом этапе сети КВТ могли передавать сигналы только в одном направлении – от головной станции к абоненту. По мере укрупнения систем КТВ падала их надежность, в связи с чем весьма остро встал вопрос эксплуатационного обслуживания этих систем. Поэтому системы КТВ стали дополняться средствами дистанционного контроля, позволявшими контролировать состояние системы и, в первую очередь, параметры магистральных усилителей. Для передачи информации о состоянии сис-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

темы на головную станцию использовалась часть спектра ниже рабочего диапазона частот (5 – 30 МГц). Начиная с 1990 г. почти все операторы КТВ стали устанавливать в своих сетях усилители с разделением используемого диапазона частот кабеля на два канала – прямой и обратный. Большинство телевизионных кабельных сетей с этого момента строились как двунаправленные. Так в системах КТВ появилась принципиальная возможность оказания пользователю интерактивных сетевых услуг.

Последовавшая затем революция в области телекоммуникационных сетей, связанная с широким внедрением оптических кабелей, коснулась и сетей кабельного телевидения. На этом этапе совершенствования сетей КТВ чисто коаксиальная среда передачи стала заменяться гибридной коаксиально-оптической средой HFC (Hybrid Fiber Coaxial). В гибридной сети КТВ сигналы транспортируются по оптическому волокну от головной станции до сетевого оптического узла ONU (Optical Network Unit), который соединяет магистральную оптическую сеть с распределительной коаксиальной сетью. Оптический узел включает в себя передатчик, приемник и фильтр для разделения прямого и обратного каналов. Расположенный далее коаксиальный сегмент требует применения двунаправленных усилителей, обеспечивающих двухстороннюю передачу сигналов. Распространение гибридных сетей КТВ, в которых коаксиальный сегмент обслуживается блоком оптической сети, стало еще одним стимулом для их применения в качестве средства передачи данных.

В середине 1990-х операторы КТВ провели исследования возможности использования инфраструктуры сети КТВ для широкополосного доступа абонентов домашнего (residential) сектора к услугам цифровой сети. В результате были разработаны соответствующие спецификации и появились устройства, которые были названы кабельными модемами. Кабельные модемы представляют собой абонентские устройства, обеспечивающие высокоскоростной доступ к сетям передачи данных через коаксиальную или гибридную коаксиально-оптическую сеть. Оказалось, что при организации доступа в Интернет они являются выгодной альтернативой решению на базе ADSL, поскольку теоретически могут обеспечивать передачу данных в прямом направлении со скоростью до 40 Мбит/с, а в обратном направлении со скоростью до 10 Мбит/с. По мнению абонентская распределительная структура сети КТВ представляет собой среду с разделенным доступом (коллективную среду), построенную по шинной топологии, наилучшим образом для организации абонентского доступа по сети КТВ подходит технология Ethernet. При этом весь коаксиальный сегмент сети КТВ может рассматриваться как одна большая локальная сеть. Отсюда следуют три принципиальных ограничения, присущих системам на базе кабельных модемов.

Во-первых, производительность классической сети Ethernet не может превышать 10 Мбит/с, поэтому скорость передачи в обратном канале (от абонента) ограничена этим значением. Во-вторых, особенностью технологии Ethernet является совместное использование среды пропорционально всеми подключенными пользователями при передаче сигнала от абонентов в сеть. Следовательно, частотная полоса, выделенная для обратного канала будет разделена между всеми кабельными модемами, подключенными к данному сегменту кабельной сети. По мере увеличения числа абонентов в сегменте скорость передачи данных для каждого из них будет уменьшаться. Казалось бы простой расчет показывает, что при подключении 200 абонентов к сегменту Ethernet с про-

20.4. Особенности использования сетей КТВ для передачи данных

изводительностью 10 Мбит/с на долю каждого достанется всего по 50 Кбит/с. Однако, это не совсем правильно, поскольку полоса канала делится только между активными абонентами. Активность абонентов непостоянна, поэтому реальная скорость передачи может возрасти в десятки раз и каждый пользователь может рассчитывать на среднюю скорость от 500 Кбит/с до 1,5 Мбит/с (в зависимости от нагрузки сегмента). Это существенная величина, особенно если сравнивать с аналоговыми модемами. В случае же постоянной и высокой активности какой-либо группы абонентов кабельный оператор всегда может расширить частотную полосу передачи, выделив под передачу данных еще один канал.

Третье ограничение также следует из того факта, что коаксиальный сегмент является коллективной средой передачи. Одна линия используется обычно совместно десятками, а то и сотнями пользователей в одном доме, поэтому теоретически существует возможность соединения каждого с каждым. В такой системе любой абонент имеет возможность, по крайней мере на физическом уровне, просматривать трафик всех абонентов в сегменте с помощью протокольного анализатора при использовании сетевой платы с поддержкой режима приема всех пакетов. Если не будут приняты меры защиты, это обстоятельство может снижать привлекательность кабельных модемов для использования в сфере бизнеса. На это можно заметить, что риск несанкционированного доступа неизбежен при подключении к Интернет по любой среде передачи. Кроме того, кабельные модемы как раз и ориентированы на обеспечение доступа в основном для частных пользователей, потому что офисные здания и предприятия в большинстве случаев не подключены к сетям кабельного телевидения. Тем не менее, защита информации в кабельной сети необходима и для ее обеспечения разработано несколько методов.

20.5. Система доступа на базе кабельных модемов

С учетом всех описанных выше особенностей доступа к цифровым сетям передачи данных посредством абонентской распределительной структуры сети КТВ рассмотрим структуру системы доступа на базе кабельных модемов. Чтобы эта система обеспечивала все функции сети передачи данных, в сети КТВ необходимо сделать некоторые изменения и дополнения, которые главным образом касаются установки дополнительного, цифрового оборудования, а также введения новых стандартов, определяющих правила предоставления высокоскоростных услуг по каналу КТВ. Сначала познакомимся с комплексом необходимого оборудования. В зависимости от размера и архитектуры сети КТВ, а также применяемых стандартов, количество и конфигурация оборудования может меняться, однако общий принцип построения системы сохраняется.

У каждого пользователя, получающего доступ к сети передачи данных устанавливается абонентский кабельный модем. Абонентский кабельный модем ориентирован на индивидуального пользователя, он обеспечивает прием, демодуляцию, декодирование данных нисходящего потока, а также кодирование, модуляцию, передачу данных восходящего потока и интерфейс с компьютером. Большинство абонентских модемов представляют собой внешние устройства, имеющие собственный блок питания и подключаемые к персональному компьютеру абонента через стандартную сетевую карту 10Base-T Ethernet. Модем также может быть внутренним, выполненным в виде платы, вставляемой в свободный разъем системной платы компьютера с поддержкой технологии "plug

and play" в среде Windows. Некоторые модели абонентских модемов имеют дополнительный порт для подключения телефонного аппарата.

Существуют и такие модификации абонентских кабельных модемов, которые имеют встроенные функции маршрутизации и могут использоваться для доступа в сеть несколькими компьютерами одновременно (коллективный маршрутизаторный модем). Такие модемы содержат таблицу на несколько MAC-адресов. Они ориентированы на корпоративного абонента и устанавливаются на сервере локальной сети, но могут использоваться и в частном секторе для организации в доме локальной сети (так называемой Ethernet-Homelan). Различные модели способны обслуживать разное число компьютеров (обычно до 20). Коллективный модем имеет интерфейс 10Base-T Ethernet для подключения к локальной сети. При использовании коллективного модема у каждого абонента должна быть установлена только сетевая карта 10Base-T Ethernet. Подключение абонентов с помощью коллективного маршрутизаторного модема осуществляется следующим образом. Непосредственно после выхода домового усилителя устанавливается разветвитель на две ветки, одна из которых уходит на домовую телевизионную разводку, а вторая – на кабельный модем. При помощи витой пары к последнему подключается концентратор Ethernet. Далее, до компьютеров абонентов домовая разводка системы передачи данных осуществляется при помощи витой пары или коаксиального кабеля. При этом необходимо учитывать ограничения на дальность связи, которые накладывает протокол Ethernet. Как правило, один коллективный кабельный модем устанавливается на один многоквартирный дом или группу близлежащих частных домов. Во втором случае промежуток между домами преодолевается с помощью коаксиального кабеля. Таким образом, в многоквартирном доме строится локальная вычислительная сеть Ethernet. Концентратор Ethernet организует физический сегмент сети передачи данных, а маршрутизаторный модем поддерживает логическую сегментацию и служит коллективным устройством доступа.

Для организации подключения абонентских модемов к сети передачи данных используется так называемый терминальный сервер кабельных модемов CMTS (Cable Modem Termination Server). Для обозначения этого устройства используются также термины "головной кабельный модем", "головная станция кабельных модемов", "мост кабельных модемов". Он выполняет в этой системе роль узла доступа абонентов и устанавливается на головной станции оператора КТВ. Чтобы наиболее эффективно использовать высокие скорости передачи данных по гибридной сети, необходимо, чтобы CMTS имел доступ в Интернет по высокоскоростной линии. Поэтому, с одной стороны CMTS подключается к коаксиальному сегменту сети КТВ, а с другой стороны он подключается к оборудованию доступа в сеть Интернет, к примеру, через порт 100Base-TX Fast Ethernet. Таким образом, CMTS реализует интерфейс связи абонентских модемов с сетью передачи данных. Головной модем является в системе доступа ключевым и многофункциональным устройством. Он обеспечивает прием, демодуляцию и декодирование данных восходящих потоков, кодирование, модуляцию и передачу данных нисходящих потоков для всех абонентов сети. Идентификация каждого абонента сети производится на уровне MAC-адресов, поэтому можно принимать и обрабатывать сразу несколько обратных потоков от разных коаксиальных сегментов. Современные модели позволяют обрабатывать до 4 прямых и 16 обратных потоков, в результате чего один CMTS способен обеспечить поддержку нескольких тысяч абонентских кабельных модемов.

Так как оператор может конфигурировать систему для обработки разного количества обратных потоков, он имеет возможность максимально оптимизировать систему для услуг, требующих той или иной асимметрии связи. Обычно головной кабельный модем имеет масштабируемую модульную архитектуру, что дает возможность кабельным операторам расширять сеть по мере роста числа абонентов путем добавления еще одного модемного модуля. Кроме функции поддержки абонентских модемов, головной кабельный модем выполняет роль внутреннего маршрутизатора, обрабатывая внутренний трафик между абонентами, находящимися в тех коаксиальных сегментах, которые к нему подключены. Тем самым, исключается лишняя передача данных за пределы сети КТВ и разгружается внешний маршрутизатор.

В связи с существенными различиями протоколов передачи данных в локальных и глобальных сетях, разнообразии используемых при этом интерфейсов и скоростей передачи, для доступа в сеть Интернет необходимо применение специального модуля, называемого пограничным или внешним маршрутизатором. Пограничный маршрутизатор (роутер) обеспечивает высокоскоростное соединение устройства CMTS с внешними каналами связи, образующими сеть Интернет. В этой системе он выполняет функцию маршрутизации данных сети Интернет, поэтому он должен иметь маршрутную таблицу Интернет-класса, которая содержит сотни тысяч маршрутов, что даёт возможность обеспечить одновременный доступ в Интернет нескольким тысячам абонентов. Он же, как правило, отвечает за маршрутизацию данных дополнительных локальных серверов и сервера системного администратора. Маршрутизатор имеет модульную структуру, позволяющую реализовать подключение к каналам Интернет, которые основаны на различных физических способах передачи данных, с помощью специализированных интерфейсных модулей. В том числе подключение может осуществляться по выделенным линиям (порт V.35), по каналам цифровой телефонии E1 (ISDN PRI), по волоконно-оптическим каналам (Gigabit Ethernet, ATM OC-3c/STM-1) или медным линиям (Fast Ethernet 100 Мбит/с). С внутренней сетью, т.е. с головным модемом CMTS, маршрутизатор соединяется через порт Fast Ethernet 100Base-TX.

Кроме комплекса коммуникационных устройств, реализующих различные функции сетевого взаимодействия, сеть должна иметь систему сетевого администрирования, т.е., комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих управление системой передачи данных. Для этого в системе устанавливаются специальные серверы, к функциям которых относятся:

- присвоение и контроль IP адресов для всех устройств сети на основе DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) и DNS (Domain Name System), а также проверка соответствия IP-адресов MAC-адресам;
- управление первоначальной загрузкой и инициализацией головного и абонентских кабельных модемов;
- хранение конфигурационных файлов всех устройств сети на основе TFTP (Trivial File Transfer Protocol);
- обновление версий программных продуктов, хранение наиболее часто используемой информации;
- взаимодействие с биллинговой системой;
- временная синхронизация работы всех устройств в системе;
- мониторинг системы, управление рабочими параметрами устройств (например, настройка мощности передатчиков, выбор канала для передачи данных).

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

Серверы системы администрирования физически могут располагаться на одном компьютере (host), который должен представлять собой компьютер промышленного стандарта или PC с процессором класса не ниже Pentium-200 с 128 Мбайт оперативной памяти. В зависимости от размеров кабельной сети система администрирования может быть децентрализованной (сервер сетевого администратора на каждой головной станции) либо централизованной (сервер сетевого администратора на единственной головной станции либо несколько серверов, объединенные в сеть). С системой сетевого администрирования взаимодействует биллинговая система, отвечающая за учет абонентов. Биллинговый сервер выполняет функции авторизации и разграничения доступа абонентов в сеть, учета трафика, сбора статистической информации о предоставленных услугах, тарификации и ведения лицевых счетов абонентов.

Такого комплекса оборудования достаточно, чтобы предоставить абонентам сети КТВ услуги, пользующиеся максимальным спросом – высокоскоростной доступ в Интернет и электронная почта (e-mail). Однако, помимо этого система может также выполнять некоторые вспомогательные функции для предоставления дополнительных услуг абонентам сети КТВ. Набор этих услуг может быть разным. Среди них организация виртуальной торговли, банковских услуг, справочных систем, библиотек файлов, IP-телефонии (передача голоса по протоколу сети Интернет). Возможен обмен между компьютерами сети мультимедийными данными, содержащими видео и аудио, при использовании протокола IP. В рамках этого же протокола может быть организован сервис "видео по заказу" или "аудио по заказу". Эти функции реализуют различные локальные серверы, которыми должны иметь возможность пользоваться все абоненты сети. Например, для предоставления "видео по заказу" в системе выделяется видеосервер, для организации IP-телефонии выделяется сервер, организующий шлюз в общественную телефонную сеть. Чтобы обеспечить доступ к этим серверам с максимальной скоростью и минимальной загрузкой каналов (особенно обратного) эти серверы должны быть размещены на головной станции и иметь высокоскоростное соединение с CMTS через внешний маршрутизатор. На каждом сервере необходимо установить соответствующее его функции программное обеспечение.

На рис. 20.3 представлена типовая схема системы на базе кабельных модемов, предоставляющей абонентам коаксиально-оптической сети КТВ доступ в сеть Интернет и некоторые дополнительные услуги. В данной схеме передача данных в обратном направлении (от абонента в сеть) организована посредством обратного канала самой сети кабельного телевидения. Для этого применяются кабельные модемы с поддержкой обратного канала. В этой схеме вместо гибридной коаксиально-оптической среды передачи может использоваться и обычная коаксиальная среда. Принципиальных различий с точки зрения конфигурации оборудования передачи данных между этими двумя вариантами нет.

Рассмотрим принцип работы этой схемы. CMTS кодирует и модулирует прямые потоки данных, перенося их в отведенный диапазон частот. Сигнал прямого потока суммируется с сигналами модуляторов головной станции перед входом оптического передатчика (или магистрального усилителя). Затем суммарный сигнал, содержащий данные и телевизионный сигнал, транспортируется к оптическим узлам коаксиальных сегментов по одному или нескольким оптическим волокнам. С другой стороны, CMTS принимает множество обратных потоков, поступающих от абонентов, демодулирует и декодирует их. Сигналы

обратного канала от всех оптических узлов преобразуются в электрические отдельными оптическими приемниками и подаются на вход демодуляторов обратного потока.

Процесс взаимодействия абонентских модемов с головным модемом осуществляется следующим образом. Предварительно головной модем CMTS проходит процедуры инициализации, самотестирования и при необходимости загрузки программного обеспечения с сервера администратора. Далее он работает постоянно, поддерживая связь с системой администрирования. После успешного окончания процесса инициализации CMTS создаёт прямой канал, в котором непрерывно передаются необходимые для инициализации абонентских модемов параметры, в том числе частота обратного канала и текущая версия программного обеспечения.

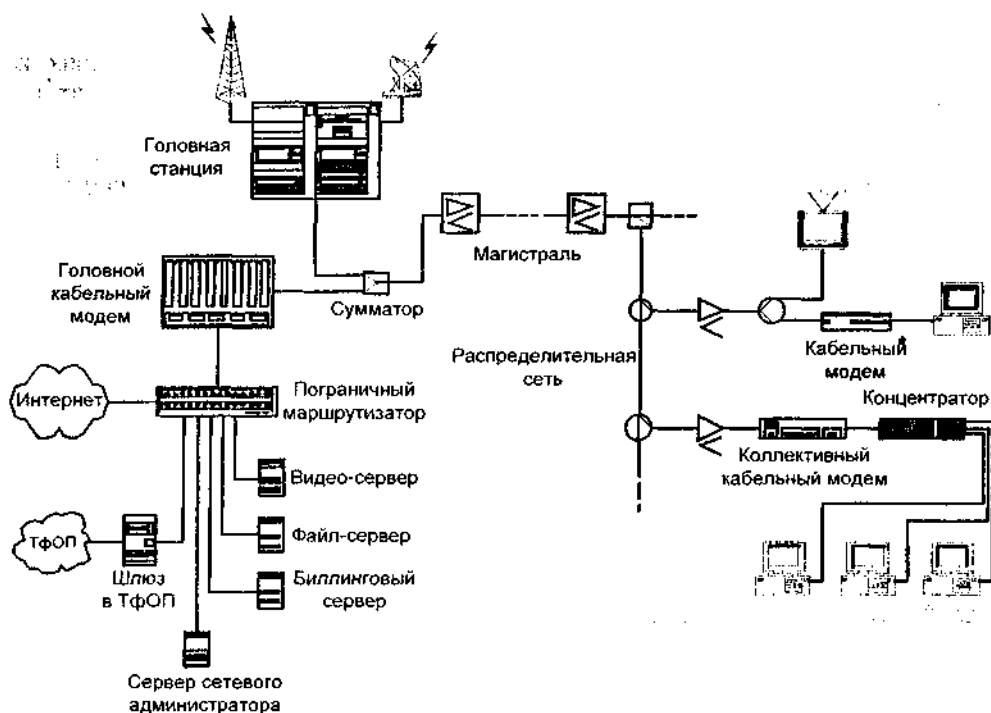


Рис. 20.3. Схема доступа на основе кабельных модемов

Кроме этой служебной информации CMTS последовательно передает данные для уже подключённых абонентских модемов. За корректное упорядочивание данных, адресованных разным модемам, отвечает сам CMTS.

Абонентский модем после включения регистрируется, обращаясь к базе данных CMTS и сообщая свой серийный номер, запрограммированный на заводе-изготовителе. Если модем не прошел регистрацию, то его дальнейшая работа блокируется. Если модем зарегистрировался на головной станции, ему разрешается загрузка и он переходит в режим инициализации. На этом этапе он сканирует частотный диапазон прямого канала, и, обнаружив сигнал (QAM-несущую), синхронизируется с головным кабельным модемом, получает содержащуюся в потоке информацию о частоте обратного канала, загружает те-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

кущую версию программного обеспечения и иные параметры, в том числе, информацию о конфигурации сети (назначенный ему IP-адрес, адрес головной станции, адреса серверов). На основе загруженных параметров затем устанавливается IP-соединение. Загрузка модема выполняется по одному из обратных каналов, который специально отведен для этих целей. Пользователь не должен следить за обновлением версии программного обеспечения модема, для него это происходит автоматически, поскольку эту задачу выполняет оператор кабельной сети. По завершении процесса инициализации абонентский модем готов к работе, т.е. к приему данных от кабельной сети и к передаче собственных данных. При этом модем и CMTS обмениваются рядом сообщений, договариваясь о параметрах сеанса связи. Между абонентским модемом и CMTS происходит точная подстройка уровней передаваемых сигналов и временных сдвигов для избежания коллизий в обратном канале. Определяются скорости передачи в прямом и обратном каналах и параметры, связанные с обеспечением качества сервиса и защитой передаваемой информации. В тех случаях, когда связь прерывается из-за сильных отклонений параметров канала от требуемых значений, абонентские модемы автоматически перезагружаются. Этот процесс осуществляется практически незаметно для абонентов: цикл загрузки пользовательского модема составляет около 30 секунд, после чего связь восстанавливается.

Управление доступом к обратному каналу осуществляет протокол MAC-уровня CSMA/CD. Во избежание конфликтов в общем кабеле, доступ каждого модема в обратном направлении требует контроля. В большинстве случаев операторы КТВ используют механизмы контроля доступа к среде с подачей команд о выделении пользовательской системе квантов времени для передачи трафика. Головной модем CMTS периодически опрашивает известные ему кабельные модемы с целью определения количества и размера временных ячеек (time-slots), необходимых тому или иному модему для передачи. После распределения ячеек модемы получают право передавать данные только в назначенный им промежуток времени. Таким образом, удаётся значительно снизить количество коллизий при передаче данных. Заметим, что обратный канал используется не только для передачи собственных данных абонента, но и для служебных целей, например, для передачи подтверждений о приеме данных по прямому каналу. Система построена таким образом, чтобы обеспечить "прозрачность" узла доступа с точки зрения абонента, т.е. абонент при передаче и приеме данных не замечает наличия между ним и цифровой сетью головного оборудования кабельных модемов.

Для сети КТВ, не имеющей своего обратного канала, используется схема, показанная на рис. 20.4. В такой системе обратный канал для абонентов сети КТВ обеспечивается по телефонной сети общего пользования (ТфОП). В этом случае абоненту устанавливается, кроме кабельного модема, еще и аналоговый телефонный модем, а на головной станции требуется установить специальный сервер доступа по телефонным линиям (шлюз в ТфОП), который будет обеспечивать связь телефонной сети с головным модемом CMTS. Сервер доступа комплектуется модемными модулями, которые могут устанавливать соединения с аналоговыми модемами с использованием всех стандартных модемных протоколов, включая V.22bis, V.32, V.32bis, V.34/V.34+, K56flex и V.90. В сетях с телефонным обратным каналом каждому абоненту присваиваются два разные IP-адреса. Один IP адрес назначается оператором сети КТВ и иденти-

фицирует абонента для нисходящего потока, второй IP-адрес (временный) назначается телефонным провайдером только на время установления телефонного соединения.

Эта схема позволяет минимизировать затраты оператора кабельного телевидения при организации доступа в Интернет, поскольку в данном случае не требуется замены линейного оборудования, если кабельная сеть не имеет обратного канала. Но для клиента такой сервис не слишком удобен, поскольку приходится устанавливать дополнительное соединение, занимая телефонную линию, а серьезный дисбаланс скоростей между прямым и обратным каналами затрудняет интерактивную работу.

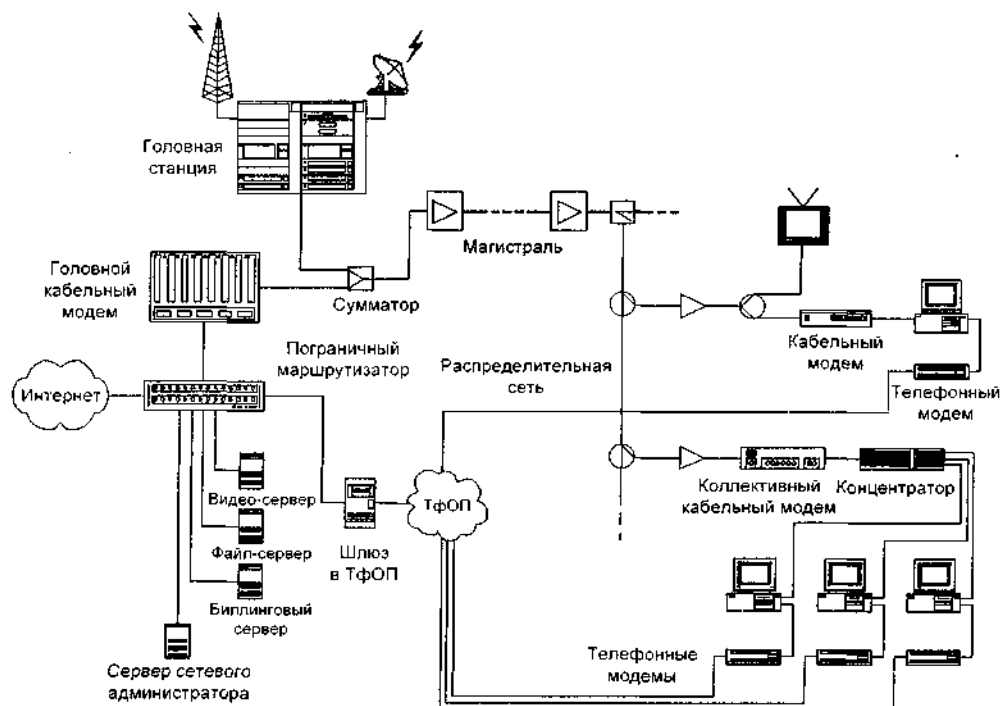


Рис. 20.4. Схема доступа на основе кабельных и телефонных модемов

Такое решение вносит обычную задержку на ожидание ответа модема на другом конце и может косвенно ограничивать скорость прямого канала, поскольку, например, подтверждения приема по протоколу TCP требуются в среднем 10% от пропускной способности прямого соединения. Следовательно, прямой поток не может быть больше 288 Кбит/с, если обратный представляет собой модемное соединение на 28.8 Кбит/с. Поэтому, если сеть КТВ уже оборудована двунаправленными усилителями, то более удачен вариант организации обратного канала по тому же коаксиальному кабелю, хотя и здесь есть свои трудности, о которых скажем далее.

К этому можно добавить, что приведенными двумя схемами не ограничиваются возможности создания интерактивной системы передачи данных. Обратный канал может быть организован и другими способами, например, с помощью беспроводной связи или по выделенным цифровым линиям.

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

Таким образом, абоненты могут подключаться к сети передачи данных тремя способами:

- абоненты с доступом по кабельной сети с обратным каналом, подключенные с помощью индивидуальных кабельных модемов;
- абоненты с доступом по кабельной сети с обратным каналом, подключенные с помощью коллективных кабельных модемов с дальнейшим объединением в локальную сеть Ethernet-Homelan;
- абоненты с доступом по кабельной сети без обратного канала, подключенные с помощью кабельного модема и аналогового модема, организующего обратный канал по сети ТФОП или другими средствами.

Абонентский кабельный модем подключается к компьютеру абонента через сетевую карту или порт USB или устанавливается прямо в компьютер в виде дополнительной платы. Головной кабельный модем расположен на головной станции и выполняет сразу три функции. Он решает задачу поддержки абонентских модемов, выполняет роль внутреннего маршрутизатора для абонентов сети КТВ и является узлом доступа в сеть Интернет (посредством внешнего маршрутизатора).

20.6. Стандарты DOCSIS и DVB/DAVIC

Теперь скажем несколько слов о стандартах. Решения в области кабельных модемов были стандартизованы в 1998 году с принятием рекомендаций ITU-T J.112 и J.83, в которых описываются методы передачи данных по сетям кабельного телевидения. Однако, довольно широко были распространены решения, основанные на фирменных протоколах связи и методах модуляции, в связи с чем появились многочисленные проблемы несовместимости оборудования различных фирм. Чтобы разрешить их были разработаны стандарты, но и здесь прийти к единому мнению не получилось. В настоящее время существует два основных стандарта, описывающих передачу данных по сетям кабельного телевидения. Первый, известный под названием DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), был разработан консорциумом CableLabs (США) в сотрудничестве с отраслевой группой MCNS (Multimedia Cable Network System), объединяющей широкий круг производителей оборудования кабельных сетей. Второй, названный DVB/DAVIC, разработан некоммерческими организациями Digital Video Broadcasting и Digital Audio Video Interface Council (отсюда и его название), и ориентирован в первую очередь на применение в Европе.

Первая версия DOCSIS 1.0 появилась в конце 1998 г. Позднее появилась его обновлённая редакция, DOCSIS 1.1, которая отличается от версии 1.0 расширенным механизмом обеспечения качества сервиса. Сейчас в стадии разработки находится следующая версия стандарта – DOCSIS 2.0, в которой для предоставления симметричных услуг предусматривается применение более совершенных технологий мультиплексирования в обратном канале. В стандарте DOCSIS учтены различия между телевизионными системами различных стран. Он содержит приложения, учитывающие специфические особенности американского, европейского и японского рынков услуг CATV и используемые в этих регионах стандарты телевизионного вещания (NTSC, PAL, SECAM).

В соответствии со стандартом DOCSIS 1.0/1.1 для прямой передачи доступна полоса частот от 91 до 857 МГц. Передача данных ведется в каналах шириной 6 МГц. Каждый канал подается на повышающий конвертор на промежуточной

20.6. Стандарты DOCSIS и DVB/DAVIC

частоте 44 МГц. Канал обратной передачи находится в диапазоне 5 – 42 МГц (для соответствия требованиям ГОСТ он может быть ограничен до 30 МГц или расширен до 65 МГц для применения в Европе) и может занимать полосу 0,2, 0,4; 0,8; 1,6 или 3,2 МГц. Стандарт DOCSIS определяет, что для предоставления услуг передачи данных используется модуляция QAM-64 или QAM-256 в прямом канале и QAM-16 или QPSK в обратном канале. Следовательно, максимальная скорость, которую можно получить в прямом канале составляет около 39 Мбит/с. Европейской разновидностью стандарта DOCSIS является EuroDOCSIS, в соответствии с которой на европейский рынок должны поставляться кабельные модемы, использующие для организации прямого канала полосу 8 МГц вместо 6 МГц. Соответственно, в этом случае при использовании модуляции QAM-64 можно достичь скорости 38,3 Мбит/с, а модуляция QAM-256 позволяет добиться скорости 52,8 Мбит/с (эффективные скорости ниже). С технической точки зрения в канале 6 МГц можно с помощью известных методов модуляции передавать данные и с более высокой скоростью, но это ухудшает распознаваемость передаваемых символов на приеме и повышает вероятность ошибочного декодирования данных. Поэтому при необходимости повысить скорость в прямом направлении передачи оператор КТВ должен выделить полосу еще одного телевизионного канала. В обратном канале кабельные модемы позволяют передавать со скоростью от 290 Кбит/с до 9200 Кбит/с в зависимости от отведенной полосы и используемого способа модуляции. С целью повышения помехозащищенности в прямом и обратном каналах предусмотрено помехозащитное кодирование кодом Рида-Соломона. Значения скоростей, достигаемые при использовании разных типов модуляции, приведены в табл. 20.1 и 20.2.

Таблица 20.1

Скорости, достигаемые в прямом канале 6 МГц и различных типах модуляции согласно DOCSIS 1.0/1.1.

Тип модуляции	Символьная скорость, Мсимв/с	Скорость передачи, Мбит/с	Эффективная скорость передачи, Мбит/с
QAM-64	5,06	30,34	27
QAM-256	5,36	42,88	39

Таблица 20.2

Скорости, достигаемые в обратном канале, при различной ширине канала и различных типах модуляции согласно DOCSIS 1.0/1.1.

Символьная скорость, Ксимв/с	Полоса канала, МГц	Скорость передачи для QPSK, Кбит/с	Скорость передачи для QAM-16, Кбит/с	Уровень входного сигнала, дБ-мВ
160	0,2	290	580	-6 ... +14
320	0,4	580	1160	-13 ... +17
640	0,8	1150	2300	-10 ... +20
1280	1,6	2300	4600	-7 ... +23
2560	3,2	4600	9200	-4 ... +26

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

Значения, представленные в этих таблицах требуют некоторого пояснения. Символьная скорость, как уже говорилось в этой главе, равна количеству состояний несущей (символов) в единицу времени. Символьные скорости несколько различаются для разных видов модуляции, поскольку это необходимо, чтобы сохранить структуру потока данных, основанную на кадрах длительностью по 3 мс. Скорость передачи – это общая скорость битового потока с учетом избыточных бит помехозащитного кодирования, дополнительных бит заголовка, преамбулы и защитного интервала. Эффективная скорость передачи – это скорость передачи полезной информации без учета избыточных бит, поэтому она всегда немного ниже. Скорости в обратном канале соответствуют его пропускной способности (максимальной скорости), но реальная скорость будет зависеть от количества одновременно активных модемов, поскольку обратный канал является многопользовательским. При выборе метода модуляции из разрешенных стандартом методов оператор сети КТВ должен исходить из физических характеристик своей кабельной сети, ее подверженности помехам. Следует помнить, что чем более информативен какой-либо способ модуляции, т.е., чем большую скорость передачи он обеспечивает, тем менее он защищен от помех, и наоборот.

Стандарт DOCSIS устанавливает ряд параметров, позволяющих контролировать уровень QoS, предоставляемый абонентам сети, что особенно актуально при передаче информации, чувствительной к задержкам (видео, речь). К этим параметрам относятся максимальная и минимальная гарантированная полосы пропускания в прямом и обратном канале, а также количество тайм-слотов в единицу времени, выделяемых модему для передачи данных по обратному каналу. Стандарт DOCSIS 1.1 определяет ряд дополнительных параметров, улучшающих качество сервиса. В частности, в нем реализованы механизмы фрагментации и сборки больших пакетов данных, организации виртуальных каналов и задания приоритетов, уменьшающие задержки при передаче речи и видео. В основном эти механизмы предназначены для поддержки IP-телефонии и видеоконференции.

В качестве механизма взаимодействия с терминальным оборудованием абонента стандарт DOCSIS предусматривает использование протокола Ethernet. В соответствии с ним данные упаковываются в кадры. Кроме того, при передаче в прямом канале кадры могут помещаться в транспортные потоки MPEG-2 для совместимости со стандартами цифрового телевидения. В качестве основного транспортного механизма для связи сети КТВ с сетью передачи данных стандарт DOCSIS использует протокол IP (Internet Protocol) сети Интернет с нефиксированной длиной пакетов. Каждому устройству в системе доступа, включая абонентские кабельные модемы, назначается свой IP-адрес. Одному абонентскому устройству, имеющему единственный MAC-адрес, может назначаться несколько различных IP-адресов. Пакет IP имеет заголовок и область данных. В заголовок каждого пакета добавляются IP-адреса отправителя и получателя данных. В соответствии с этими адресами головное оборудование маршрутизирует пакеты данных от абонентов кабельной сети во внешнюю сеть Интернет и обратно. В стандарте DOCSIS реализована прямая поддержка протокола IP, без преобразований формата пакетов. В дополнение к стандарту DOCSIS был выпущен ряд спецификаций, объединенных названием Packet Cable. Они касаются порядка функционирования системы сетевого менеджмента, сигнализации и механизмов гарантирования качества QoS.

Альтернативный стандарт, описывающий технологию двунаправленной передачи данных в сетях кабельного телевидения, называется DVB/DAVIC. Он разработан в 1998 г. в основном для использования в европейских сетях КТВ. В самых общих словах, этот стандарт сочетает в себе протокол IP и стандарт цифрового кабельного телевидения DVB-C, как средство доставки цифровых сигналов по кабельным сетям. Однако здесь, в отличие от DOCSIS, для передачи пакетов IP используется протокол ATM, т.е., пакет IP сначала преобразуется в формат ячеек ATM, которые и передаются по кабелю. На приемной стороне производится обратное преобразование. Эта процедура называется пакетной инкапсуляцией. Данные также передаются внутри транспортного MPEG-2 потока. Параметры передаваемых сигналов должны соответствовать стандарту DVB-C. Распределение частот в DVB/DAVIC соответствует европейской сетке вещания с шагом 7 или 8 МГц, поэтому для обратной передачи доступна полоса частот 5 – 65 МГц, в которой могут выделяться каналы шириной 0,2; 1,0; 2,0 или 4,0 МГц. В обратном канале используется только QPSK модуляция, и битовые скорости составляют, соответственно, 0,25; 1,54; 3,08 и 6,17 Мбит/с. Особенностью DVB/DAVIC является возможность внеполосной передачи в прямом канале (OOB), при которой прямой передача осуществляется в каналах шириной 1 или 2 МГц в полосе частот 70 – 130 МГц или 300 – 862 МГц. В этом режиме скорости передачи при использовании QPSK модуляции составляют 1,54 и 3,08 Мбит/с.

В качестве формата передаваемых данных в DVB/DAVIC приняты короткие ячейки ATM фиксированной длины (53 Байт), а не кадры Ethernet переменной длины (до 1500 Байт) как в DOCSIS. При значительном объеме передаваемой информации эффективность передачи ячеек DVB/DAVIC ниже эффективности передачи пакетов DOCSIS, но, в то же время, увеличение объема пакета затрудняет одновременную работу большого числа пользователей. С другой стороны, фиксированный размер ячеек ATM, затрудняет работу таких служб, как VoIP (Voice over IP, передача голосовой и видеоинформации по протоколу IP). Этого недостатка лишен DOCSIS, имеющий прямую поддержку IP. В среднем размер большинства IP пакетов лишь немного больше размера ячеек ATM. Однако гибкая и масштабируемая структура потока ячеек ATM позволяет передавать мультимедийную информацию с большими скоростями и увеличивает возможности системы в плане роста емкости и интеграции услуг. Нужно отметить, что с целью совместимости систем в DOCSIS предусмотрена передача ATM ячеек, а в DVB/DAVIC поддерживается возможность работы с тайм-слотами. В целом, компьютерные сети, организованные в сетях КТВ с помощью любого из этих двух стандартов, обладают высокими скоростными показателями и позволяют предоставить в сети большой набор современных услуг, включая интерактивное телевидение и видео-телефонию.

20.7. Проблемы и достоинства кабельных модемов

Ранее уже говорилось, что использование распределительной коаксиальной структуры сети КТВ для интерактивного обмена данными, осложняется рядом обстоятельств, обусловленных ее архитектурой. Наиболее серьезные проблемы связаны с обратным каналом. Поскольку обратный канал является многопользовательским, его пропускная способность, максимальное значение которой может составлять около 10 Мбит/с, делится более или менее пропорцио-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

нально числу пользователей, одновременно подключенных к коаксиальному сегменту сети КТВ. Таким образом, качество получаемых пользователями услуг будет ухудшаться по мере присоединения новых пользователей. Самым очевидным решением при возникновении перегрузки в коаксиальном сегменте является ввод кабельным оператором новых ресурсов, но это сокращает прибыльность. Другим вариантом может быть уменьшение размеров коаксиального сегмента путем продвижения волоконно-оптических кабелей ближе к группам потенциальных пользователей. Это позволит снизить нагрузку сегмента, уменьшив количество обслуживаемых им пользователей, что естественным образом приведет к увеличению средней скорости доступа каждого из абонентов. Трудности здесь все те же – чисто экономические, потому что при прочих равных условиях кабельным операторам выгоднее иметь крупные разделяемые сегменты. Данные в сегменте Ethernet передаются всем модемам одновременно, поэтому возникает необходимость защиты данных пользователя от несанкционированного просмотра. Конфиденциальность данных в сетях КТВ можно обеспечить разными способами, гарантирующими разную степень защиты. Фактически стандарт DOCSIS предусматривает установку средств шифрования данных (DES) на каждый модем. Это решение, являющееся, по-видимому, наилучшим способом обеспечения защищенной передачи информации по сетям кабельного телевидения. Однако применение дополнительного оборудования увеличивает общую стоимость модемов и административную нагрузку и к тому же повышает требования к техническому персоналу кабельного оператора. Некоторые кабельные модемы имеют встроенные мосты уровня доступа к среде передачи (MAC), лишаящие абонентов возможности видеть любые кадры, помимо предназначенных непосредственно им.

Кроме архитектурных ограничений, связанных с использованием разделяемой среды, существуют и чисто технические проблемы. Дело в том, что сети кабельного ТВ и, в частности, частотный диапазон между 5 МГц и 42 МГц, выделенный для обратных информационных каналов, чрезвычайно чувствителен к внешним помехам (ingress noise) со стороны компьютерного оборудования, радиостанций Си-Би диапазона, бытовых приборов (печей СВЧ, холодильников, выключателей, электромоторов). Усилители обратного канала вместе с сигналом усиливают и шум, так что иерархическая шинная топология способствует концентрации шумов по мере приближения сигнала к головной станции. По той же причине недостаточно высоким получается качество предоставления речевых телефонных услуг по сети КТВ.

Существует несколько способов разрешения этих трудностей. Выходом может стать применение менее информативных видов модуляции. Именно поэтому стандарт DOCSIS предусматривает использование в обратном канале только модуляции QAM-16 или QPSK. Широко используемый метод QPSK наименее эффективен, но его применение зачастую неизбежно в условиях высокой зашумленности. Другим способом обеспечения приемлемого качества обратного канала является автоматическая смена частоты (в указанных пределах) при ухудшении отношения сигнал/шум. Взаимовлияние каналов, используемых для передачи данных, и обычных телевизионных каналов достаточно мало и им можно пренебречь. Возможно применение управляемого фильтра, блокирующего сигналы обратного канала на все время, кроме интервалов передачи данных. Фильтр устанавливается около абонентского ответвителя и управляется сигналом модема. Еще одно решение проблемы внешних помех

состоит в прокладке оптического кабеля как можно ближе к абонентам. Протяженность коаксиального сегмента в этом случае уменьшается и накопленные шумы снижаются. В случае очень сильной и неустраняемой зашумленности полосы кабельного обратного канала, вероятно, будет целесообразным использование для обратной передачи обычной телефонной линии или какой-либо другой среды.

Передача по прямому каналу гораздо менее проблематична. Он имеет широкую полосу частот и менее высокий уровень наводимых помех, вследствие чего в нем могут использоваться более скоростные методы модуляции. Кроме того, пропускная способность прямого канала не делится между подключенными устройствами. Этим объясняется существенная разница скоростей прямого и обратного каналов.

Несмотря на вышеупомянутые ограничения технология кабельных модемов имеет и значительные преимущества перед другими методами абонентского доступа. Решение на базе кабельных модемов, скорее всего, окажется наиболее скоростным из всех возможных вариантов доступа в Интернет, даже по сравнению с решением на базе DSL-модемов.

Применение технологии кабельных модемов позволяет весьма изящно решить обычные проблемы абонентского доступа по коммутируемым линиям. Двухнаправленное соединение на основе кабельного модема будет доступным постоянно, поскольку кабельные модемы работают в режиме "always on", т.е. напрямую подключены к головному узлу и всегда готовы к работе. В такой системе задержка на установление соединения, в отличие от аналоговых модемов, отсутствует, а это очень важно для организации полноценной интерактивной работы и особенно для передачи мультимедийной информации, чувствительной к задержкам. Кабельные модемы передают трафик Интернет прямо на маршрутизатор Интернет, расположенный на головном узле системы КТВ. Вследствие этого соединение будет работать более стабильно и надежно. Телефонная линия остается свободной для использования по прямому назначению.

Иерархическая топология кабельной сети имеет и свои недостатки, о которых было сказано выше, и свои преимущества. Преимущество состоит в экономии оборудования и снижении стоимости проекта для кабельного оператора, поскольку один коллективный модем способен обслуживать множество подключенных к нему компьютеров пользователей в отличие, например, от телефонных сетей, где каждый абонент должен обслуживаться отдельным модемом. Это очень удобное и экономичное решение для офисов небольших компаний и многоквартирных домов.

Несомненным достоинством технологии кабельных модемов является также то, что она в большинстве случаев может использовать существующую кабельную инфраструктуру сетей КТВ. Если кабельная сеть изначально была спроектирована с учетом стандартных требований к сетям КТВ, то для внедрения системы не потребуются прокладки новых или замены старых коммуникационных линий, достаточно установить оконечное оборудование на головной станции и у абонентов и произвести регулировку уровней сигналов. Стандарт не исключает возможности работы в любых сетях кабельного телевидения: коаксиальных и гибридных волоконно-коаксиальных, однонаправленных и двухнаправленных. Выпускаемое сейчас оборудование допускает одновременное использование в одной системе кабельного и телефонного обратных каналов. Это обстоятельство позволяет оператору внедрить систему передачи данных в

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

однаправленную кабельную сеть с обратным каналом через ТфОП, а затем, постепенно модернизируя сеть, переходить на кабельный обратный канал, минимально изменяя конфигурацию головного оборудования. Модульность оборудования позволяет оператору легко масштабировать систему, т.е. с минимальными затратами наращивать число абонентов системы от нескольких сотен до нескольких тысяч. Гибкость системы позволяет на базе одного и того же оборудования создавать разные конфигурации с предоставлением абонентам множества услуг.

Элементная база кабельных модемов доступна и сравнительно недорога, а тот факт, что разработанный и повсеместно принятый стандарт DOCSIS обеспечивает совместимость интерфейсов, делает возможным совместное использование кабельных модемов разных производителей. Подключение головного и абонентского оборудования на аппаратном и программном уровнях не представляет проблем. Возможность предоставления канала с гарантированными параметрами полноценно реализована в версии стандарта DOCSIS 1.1, что дает возможность работать даже с мультимедийными приложениями, крайне критичными к качеству связи.

20.8. Требования к кабельной сети

Оборудование доступа к сетям передачи данных обычно разрабатывается для работы в самых разных сетях кабельного телевидения. Чтобы это оборудование было работоспособно, необходимо, чтобы характеристики сети соответствовали определенным требованиям. Это общие требования для оборудования, поддерживающего передачу данных в кабельных сетях. Решающее значение имеет общее затухание сигнала на пути от головной станции к абоненту и обратно и отношение несущая/шум для обоих направлений. Поэтому перед началом проекта оператору следует убедиться в том, что характеристики его кабельной сети соответствуют хотя бы основным требованиям, которые можно сформулировать следующим образом.

Все пассивные и активные элементы кабельной сети должны обеспечивать необходимое качество передачи сигнала в диапазоне частот от 5 до 862 МГц.

Необходимо учесть затухание, вносимое всеми сумматорами и делителями, которые необходимы для подключения цифрового оборудования к кабельной сети.

Желательно, чтобы разброс уровней сигналов, приходящих от абонентских модемов на вход головного кабельного модема, не превышал 10 дБ. Система продолжает функционировать и при больших разностях, однако снижается скорость передачи данных, поскольку часть времени используется для адаптации системы автоматической регулировки усиления.

Следует учитывать, что надежность работы абонентских модемов меняется при изменении уровней сигнала в кабельной сети. Желательно, чтобы отклонение уровня на входе абонентских модемов не превышало 6 дБ. Если отклонение уровня находится в допустимых пределах, оно будет скорректировано внутренним АРУ модема.

Серьезное внимание необходимо уделить качеству заделки разъемов. Плохой контакт на высоких частотах позволяет лишь с небольшими потерями передавать телевизионный сигнал через емкостную связь. На частотах обратного канала эта емкость практически не будет проводить сигнал. К тому же подоб-

20.8. Требования к кабельной сети

ные неоднородности вызывают появления фазовых искажений, что затрудняет демодуляцию QAM-сигнала, особенно с высокими скоростями потока (64, 256).

Желательна поддержка обратного канала всеми усилителями коаксиальной сети. В этом случае для домовых усилителей достаточно пассивной поддержки, для магистральных и субмагистральных необходима как пассивная, так и активная поддержка. Оптимальным является соотношение приблизительно 3 – 4 усилителя с поддержкой пассивного обратного канала на 1 усилитель с активным обратным каналом.

Для уменьшения наводок в обратном канале следует повысить внимание к уровню утечки сигнала в прямом канале (традиционные нормы для этой величины здесь оказываются недостаточными) и к отношению C/N.

На входе первого усилителя обратного канала необходимо иметь примерно одинаковые уровни сигналов от всех кабельных модемов. Разность уровней сигналов в абонентских ответвлениях может быть компенсирована с помощью АРУ.

В табл. 20.3 приведены основные радиочастотные параметры, которые должны быть выдержаны в кабельной сети.

Таблица 20.3

Параметры кабельной сети, используемой для передачи данных, согласно стандарту DOCSIS 1.0.

Параметр	Прямой канал	Обратный канал
Диапазон частот	50 – 860 МГц	5 – 42 МГц
Сезонные отклонения уровня сигнала	<8 дБ	<8 дБ
Волновое сопротивление	75 Ом	75 Ом
Пульсация амплитуды	<0,5 дБ в полосе канала	<0,5 дБ/МГц
Пульсация группового времени задержки	< 75 нс в полосе канала	< 200 нс/МГц
Максимальная задержка передачи	< 0,8 мс	< 0,8 мс
Возвратные потери на входе и выходе модема	> 6 дБ	> 6 дБ
Уровень сигнала модема	-15...+15 дБ-мВ	+8...+58 дБ-мВ
Отношение несущая/шум (при уровне цифровой несущей равном максимально-му уровню аналоговой)	>35 дБ	>25 дБ

При организации услуг передачи данных и доступа в Интернет по сети КТВ можно порекомендовать следующую последовательность действий. Сначала следует произвести настройку головного и пользовательских модемов, установить на них необходимое программное обеспечение, которое должно поставляться вместе с оборудованием, добиться загрузки кабельного модема и понять принцип его работы. Затем необходимо понять, как влияют параметры прямого и обратного каналов на работу кабельных модемов. Для этого аба-

Глава 20. Передача данных по кабельной сети

нентский модем подключается в сеть непосредственно после первого магистрального усилителя. Успешно завершив этот этап, можно представить последовательность усилителей на линии как один усилитель, для которого требуется отрегулировать параметры. Далее следует настройка линии сети КТВ в соответствии с требованиями, выявленными на предыдущем этапе. Необходимо найти нужный баланс значений ослабления сигнала в прямом и обратном каналах с помощью аттенуаторов. Проблемы при этом могут быть связаны с наличием помех в кабеле, а также с плохой работой головного модема при низком номинале ослабления сигналов в обратном канале. Если линия соответствующим образом отрегулирована можно приступить к установке абонентского кабельного модема на выбранном участке линии. После этого выполняется тестирование системы в рабочих условиях и при необходимости подстройка ее параметров.

Чтобы оператор был уверен в работоспособности системы кабельных модемов, ему удобнее всего обратиться к одному из системных интеграторов – организации, не только поставляющей оборудование, но решающей все задачи строительства и модернизации сети, от разработки технико-экономического обоснования и технического задания до сдачи в эксплуатацию и технической поддержки. Проект должен быть разработан с учетом требований, предъявляемых Министерством Связи и органами Госсвязьнадзора, а также специфики использования сетей кабельного телевизионного вещания для передачи данных.

Кроме всего прочего, внедрение услуг цифровой сети в сеть КТВ потребует от оператора сети повышения технического уровня своих сотрудников и, возможно, привлечения новых специалистов. Помимо традиционных телевизионных технологий персонал сети должен освоить основы построения компьютерных сетей, принципы технологии Ethernet и протокола IP, разобраться в конфигурации и программном обеспечении терминального оборудования.

Резюме

Доступ к услугам передачи данных по сетям КТВ организован с помощью системы кабельных модемов. Порядок передачи данных по кабельной сети описывают стандарты MCNS DOCSIS-1.0/1.1 и DVB/DAVIC. В соответствии с этим стандартом скорость передачи в прямом канале ограничена значением 52 Мбит/с. Скорость передачи в обратном канале теоретически не может превышать 10 Мбит/с ввиду использования кабельными модемами интерфейса Ethernet. Стандарт DOCSIS предусматривает передачу информации, чувствительной к задержкам (видео, речь). Для этого используются механизмы QoS, аналогичные применяемым в сетях передачи данных.

Особенности архитектуры сетей КТВ определяют порядок доступа по ним. Распределительный коаксиальный сегмент сети КТВ представляет собой разделяемую среду передачи. Вследствие этого, системам на базе кабельных модемов присущи некоторые недостатки. Прежде всего, такая система является "открытой", т.е. в ней существует возможность доступа к данным другого пользователя. Стандарт DOCSIS имеет собственную базовую систему защиты BP (Baseline Privacy) и позволяет использовать другие механизмы обеспечения конфиденциальности информации. Результатом совместного использования полосы пропускания обратного канала всеми подключенными абонентами является еще и то, что полоса частот, доступная каждому уменьшается по мере

увеличения числа абонентов в сегменте. Ограничение числа абонентов, подключаемых к каждому коаксиальному сегменту кабельной сети, является необходимостью как с точки зрения нагрузки сегмента; так и с точки зрения роста влияния внешних помех на протяженном коаксиальном участке. В одном сегменте обычно допускается наличие не более 500 точек подключения оконечного оборудования. Это снижает прибыльность системы, поскольку, чем больше пользователей подключено к одному кабелю, тем выгоднее оператору сети КТВ. Комплексным решением является прокладка оптического кабеля от распределительных устройств как можно ближе к абонентам. Помимо всего прочего, это позволяет увеличить совокупную емкость кабельной сети и устранить необходимость использовать множество усилителей для восстановления сигнала.

Широкий спектр оборудования доступа на базе кабельных модемов позволяет создавать различные конфигурации подключения абонентов (с индивидуальным подключением, с включением в локальную сеть Ethernet, с обратным кабельным каналом и без него). Гибкость оборудования позволяет легко масштабировать систему, увеличивая ее емкость по мере подключения новых абонентов. Реализовать в полном объеме все возможности, предоставляемые системой доступа на базе кабельных модемов, можно только в гибридных волоконно-коаксиальных сетях КТВ. Кроме предоставления индивидуальному абоненту доступа в Интернет и услуг электронной почты система может предоставлять широкий спектр услуг, включая организацию файл-серверов, баз данных, видео по запросу и аудио по запросу, сетевых онлайн-игр, IP-телефонии. Постепенно расширяя систему, оператор сети может вводить новые услуги по мере роста спроса на них.

Использование сети кабельного телевидения для предоставления услуг передачи данных предъявляет к ней дополнительные требования по сравнению с передачей обычного телевизионного сигнала. Помимо подключения и настройки абонентского и головного оборудования, может оказаться необходимым дополнительный расчёт и перестройка прямого и обратного каналов.

Глава 21

ПИТАНИЕ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

В этой главе рассматривается организация системы питания распределительной кабельной сети. Делается обзор общих требований к системе питания, рассматривается принцип питания усилительного устройства. Дается характеристика двух систем питания – местной и дистанционной, из которых большее внимание уделяется последней. Далее приводятся способы расчета системы питания на примерах магистральных сетей, демонстрирующих возможности применения источников дистанционного питания.

21.1. Требования к системе питания

В системах КТВ потери передачи в кабеле и различных приборах компенсируются с помощью магистральных и домовых усилителей, которым требуется питание. Однако питание требуется не только усилителям, все активные приборы в кабельной сети должны быть каким-либо образом подключены к электрической сети. При поддержке в сети телефонной службы через абонентские ответвления могут получать питание интерфейсные устройства кабельной телефонии. В некоторых системах используются активные абонентские ответвители, которые кроме простого распределения передаваемых сигналов по абонентским ответвлениям выполняют функции абонентских конверторов, а иногда и обладают способностью дескремблирования сигнала. Эти ответвители требуют питания. Для снабжения электроэнергией каждого активного прибора на протяжении всей кабельной структуры устанавливаются источники питания.

Существует два способа организации системы питания – дистанционное и местное. Местное питание подается постоянным напряжением с помощью блоков питания, устанавливаемых непосредственно в местах включения активных приборов. Сами блоки питания, в свою очередь, получают питание от местной электросети. Местная система питания хороша тем, что проще в реализации и не требует никаких особенных проектных расчетов, но ее значительным недостатком становится зависимость кабельной сети от электросети. Фактически кабельная сеть с таким питанием не является самостоятельной структурой – она должна строиться параллельно с сетью электропитания. Другим недостатком местного питания является низкая надежность – в случае аварии в местной электросети кабельная сеть тоже выходит из строя. На раннем этапе развития систем КТВ это не считалось проблемой, поскольку предполагалось, что когда электросеть выходит из строя, ТВ приемники абонентов также перестают работать. Ошибочность этого положения состоит в том, что работа электросети может быть нарушена только на небольшом участке обслуживаемой сетью области. Все остальные телевизионные приемники, находящиеся вне этого участка будут работать, но не смогут принимать сигналы системы КТВ, так как часть усилителей на кабельном маршруте не будет усиливать сигнал. Следовательно

но, в отсутствии резервного питания прекращение питания какого-либо одного участка системы означает прекращение работы всей системы. Это становится вовсе недопустимым, если сеть поддерживает не относящиеся к телевидению службы, такие как сигнализация, контроль температурных датчиков, передача данных, для которых надежность системы особенно важна. То же самое, хотя и в меньшей степени, относится к дистанционному питанию.

Дистанционное питание осуществляется по коаксиальному кабелю, по его центральному и внешнему проводникам, от источника дистанционного питания (ИДП) переменного напряжения с помощью так называемого инсертера или “вставки питания” (power insert). Сам источник питается от общественной платной электросети с переменным напряжением 220 В частоты 50 Гц и вырабатывает переменное напряжение 60 В частоты 50 Гц. С выхода ИДП переменное напряжение подается на инсертер, который включается прямо в кабель посредством резьбовых разъемов. Обеспечить питание всей кабельной сети сколько-нибудь значительной протяженности от одного ИДП технически невозможно. По низкой частоте 50 Гц структура разбита на множество небольших участков (не соответствуют усилительным участкам) или секций и все усилители внутри такой секции питаются от одного центрального источника этой секции. Т.е., секция дистанционного питания содержит один ИДП и обеспечивает питание нескольких усилительных участков. Питание подается в оба направления от вставки. Источники дистанционного питания следует располагать периодически по всей кабельной структуре. Кабельная сеть с дистанционным питанием гораздо менее зависима от электросети, но авария одного источника питания также приведет к отключению если не всей сети, то, по крайней мере, большей ее части, поэтому сам ИДП нужно подключать к надежной электросети. Как правило, самая надежная точка электроснабжения – это точка питания головной или узловой станции, но, как будет видно далее, возможность питания магистрали от головной станции значительно ограничена.

С целью повышения надежности системы питания сети КТВ предусмотрены два пути – использование источников бесперебойного питания (ИБП, он же uninterruptible power supply, UPS) и резервирование. Для России это стало особенно актуально в последние годы, когда участились сбои в работе кабельной сети, причинами которых являются перебои и аварии в городских электросетях в местах электропитания магистральных усилителей. Классификация по категориям надежности устройств электроснабжения для питания головных станций и усилителей распределительных сетей коллективного приема приведена в соответствующих нормативных документах и нет смысла здесь на ней останавливаться. Использование ИБП можно рекомендовать для источников, обеспечивающих питание на наиболее ответственных участках магистрали (ответственность участка можно характеризовать числом абонентов, попадающих в зону аварии при отказе системы). Установка ИБП не потребует переоборудования кабельной сети или замены усилителей, они могут работать с любым типом усилителей, хотя и нуждаются в регулярном техническом обслуживании. Смысл идеи резервирования состоит в том, чтобы использовать одновременно две системы питания – местную и дистанционную. Около каждого усилителя устанавливается блок резервного питания, что снижает вероятность остановки сети не только в случае аварии электросети, но и при неисправности самого источника питания. При аварии электросети резервный блок будет обеспечивать резервное питание одного или нескольких находящихся рядом усилителей в зависимости от потребляемой мощности усилителей и типа коаксиального кабеля.

Глава 21. Питание кабельной сети

В стандарте EN-50083 сформулированы некоторые требования к системам электропитания распределительных кабельных сетей. В частности, регламентируются такие величины как максимальные допустимые напряжения питания в магистральной линии и в фидерном отводе, минимальные напряжения питания и другие нормы, касающиеся мер предосторожности при работе с системами питания и их защиты от контакта с близлежащими системами распределения электроэнергии. Среднеквадратическое значение напряжения питания в линии между внутренним и наружным проводниками кабеля не должно превышать 65 В для переменного тока и 120 В для постоянного тока. В случае обратного питания активных приборов среднеквадратическое значение напряжения питания между внутренним и наружным проводниками кабеля не должно превышать 24 В для переменного тока и 34 В для постоянного тока. Оборудование должно быть разработано и сконструировано таким образом, чтобы в обычных условиях и в случае появления неисправностей не могли возникать опасные токи. Для определения величины напряжения переменного тока должны использоваться только точные исправные приборы.

При строительстве и эксплуатации сети следует соблюдать следующие меры предосторожности:

- электропитание по кабелю должно быть ограничено магистральными и фидерными линиями, и не должно распространяться на абонентские отводы;
- источники питания линии должны быть недоступны для посторонних лиц, доступ к ним может быть возможен только для обслуживающего персонала после снятия защитных крышек с оборудования с помощью специальных инструментов;
- если составные части антенной системы находятся на открытом воздухе рядом с электросетью с напряжением до 1000 В, то расстояние по горизонтали между составными частями антенны, ее опорными конструкциями (мачтами) и электросетью должно быть не менее 1 м.
- расстояние между составными частями кабельной системы и изолированными деталями электросети с напряжением от 50 В до 1000 В (включая все опорные конструкции), должно быть не менее 10 см при внутренней установке и 20 см при наружной (при наличии между проводниками двух систем изоляционного материала, гарантирующего отсутствие их контакта, это расстояние может быть меньше), а для электросети с напряжением выше 1 кВ это расстояние должно быть не менее 3 м.
- допускается установка штепсельной розетки и выхода системы в общей коробке, если выход системы изолирован от токоведущих частей системы энергоснабжения.

При проектировании системы питания нужно каким-то образом оценивать ее эффективность. Показателем эффективности является необходимое число источников дистанционного питания во всей кабельной сети или число активных устройств, приходящееся на один источник питания. Это число определяется падением напряжения в секции кабельной сети. Падение напряжения зависит от двух факторов. Первым фактором является сопротивление кабельного контура по постоянному току, которое складывается из сопротивлений наружного и внутреннего проводников. Сопротивление контура зависит от длины кабеля и его нельзя путать с волновым сопротивлением, которое постоянно и всегда равно 75 Ом. При подборе магистрального коаксиального кабеля на этот параметр следует обращать внимание, особенно в системах с высоким энергопо-

треблением. Нужно иметь в виду, что величины сопротивлений внешнего и внутреннего проводников для различных марок кабеля значительно различаются (в 7 – 10 раз), и при большой протяженности кабельной линии это различие может заметно сказаться на падении напряжения. Дополнительным фактором в расчете падения напряжения в секции, косвенно связанным с первым, является увеличение сопротивления цепи коаксиального кабеля при повышении температуры окружающей среды, поэтому в идеальном случае расчетные данные должны учитывать крайние температуры, в условиях которых может эксплуатироваться кабельная сеть. Если компенсация температурных эффектов не была предусмотрена в проекте системы, то кабельная структура может работать нестабильно при сезонных изменениях температуры.

Второй важный фактор – полное энергопотребление или полная мощность, потребляемая всеми активными приборами данной секции. На каждом усилительном участке секции потребляемая мощность складывается из мощности всех активных приборов, питающихся от одной точки. Например, для магистрального участка это сумма мощности самого магистрального усилителя и мощностей всех фидерных усилителей, подключенных к этому участку. При расчете нужно исходить из максимальной потребляемой мощности каждого активного прибора, которая необходима для питания всех основных и вспомогательных (optional) модулей, предусмотренных конфигурацией данного устройства. Нужно учитывать энергопотребление модулей, не только используемых в момент первоначального строительства сети, но и тех, которые могут потребоваться в будущем. В частности, это относится к усилительному модулю обратного канала, блоку автоматической регулировки, блоку мониторинга и контроля состояния усилителя и к другим специальным модулям. Хотя стандартом современных кабельных сетей предусмотрена двунаправленная передача, можно допустить, что изначально сеть проектируется как однонаправленная с телефонным обратным каналом или вовсе без него, но в ходе эксплуатации выясняется, что имеется множество потенциальных абонентов, готовых оплачивать интерактивные услуги. Может потребоваться модернизация оборудования, но с точки зрения питания важно, что в направлении обратной передачи нужно будет (как и в прямом направлении) обеспечить периодическое усиление сигнала, подав питание на усилительные модули обратной передачи. Другой пример планируемого увеличения энергопотребления – в кабельной сети транк-фидер к транковому усилителю добавляется мостовой усилительный модуль, чтобы создать более высокие уровни передачи в фидерной кабельной сети. Как правило, питание к фидерным усилителям подается посредством транковых усилителей по коаксиальным кабелям фидерной структуры.

Таким образом, напряжение источника секции дистанционного питания зависит от суммарного потребления активных элементов и от полного сопротивления кабельного контура в пределах этой секции. Эти факторы связаны друг с другом через протяженность секции. Понятно, что цель разработчика в том, чтобы сделать протяженность секции как можно больше. В ряде случаев выбор кабеля с низким сопротивлением контура позволяет уменьшить необходимое число источников питания, но и уменьшение потребляемой мощности приводит к тому же результату. Взаимосвязь потребляемой мощности и сопротивления кабельного контура отражена на графиках, изображенных на рис. 21.1. Здесь показаны зависимости протяженности секции питания, выраженной количеством усилительных участков N , обеспечиваемых питанием от одного ИДП, от

Глава 21. Питание кабельной сети

сопротивления кабельного контура R_k при разных потребляемых мощностях P_n . Чем больше потребляемая мощность, тем меньше усилителей будет входить в секцию при том же значении R_k .

В процессе проектирования секции питания с некоторой степенью точности должны быть учтены следующие факторы:

- сопротивление кабельного контура всех отрезков кабеля в секции;
- выходное переменное напряжение и ток источника дистанционного питания (ИДП);
- токи, потребляемые всеми устройствами секции, включая модули, которые могут быть добавлены позднее;
- минимальные входные напряжения, требуемые всем типам оборудования секции с учетом увеличения потребляемого тока при более низком потребляемом напряжении;
- рост энергопотребления вследствие возможного расширения сети, которое было запланировано при первоначальном проектировании и может потребоваться позднее.

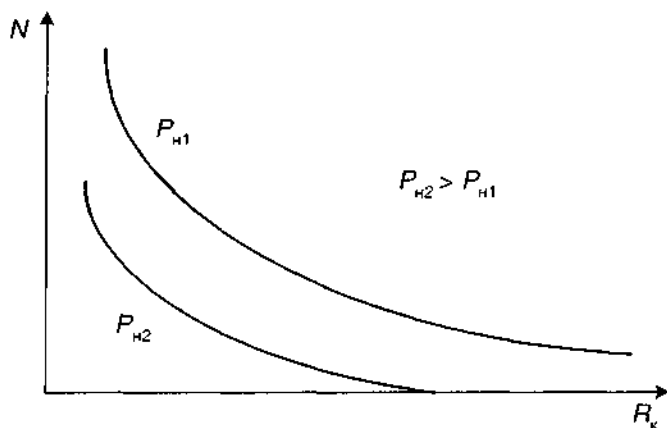


Рис. 21.1. Протяженность секции дистанционного питания

В окончании коаксиальной кабельной линии, по которой подается питание, необходимо, как и в окончании любого кабеля, выход которого не подключен к входу прибора, установить согласованную нагрузку (заглушку-терминатор) для устранения отраженной волны. Окончание должно быть терминировано по переменному току, поэтому сопротивление заглушки не может быть чисто резистивным.

21.2. Источники питания активных устройств

Источники питания получают электроэнергию от общественной электросети (220 В, 50 Гц) и вырабатывают пониженное переменное напряжение (от 40 до 60 В, 50 Гц), которое используется для снабжения энергией некоторого числа активных устройств в пределах секции кабельной сети. Для повышения эффективности подачи питания выходное напряжение современных источников имеет не синусоидальную форму, а квадратично-импульсную форму или меандр.

Источники питания имеют множество различных внутренних авторегулировок для ограничения и компенсации перепадов и всплесков входного напряжения в общественной электросети и выработки выходного напряжения требуемой формы. Источник питания усилителя защищается плавким предохранителем, а кроме того, для защиты от всплесков напряжения, наведенных в коаксиальном кабеле молнией или вызванных перепадами напряжения в общественной электросети, в цепь центрального проводника коаксиального кабеля могут включаться газоразрядные предохранители.

Для повышения надежности системы питания, источники могут поддерживать бесперебойное питание с помощью аккумуляторных батарей и зарядных устройств к ним. Заметим, что выходное напряжение источника измеряется для переменного тока, поэтому нормируемая величина 60 В – это не амплитуда, а среднеквадратическое (RMS) значение выходного напряжения, которое для синусоидальной формы меньше амплитуды в $\sqrt{2}$ раз.

Все современные усилительные модули и другие активные приборы строятся на основе транзисторных или интегральных схем. Они требуют относительно низкого постоянного напряжения питания, обычно не более 24 В. В ранних системах КТВ предпринимались попытки дистанционно подавать питание на усилители по коаксиальному кабелю постоянным током (D/C), но возникли электролитические проблемы с кабельными разъемами и проводниками, сделанными из разнородных металлов. Поэтому на протяжении всех последующих лет и до сегодняшнего момента используется подход, при котором дистанционное питание обеспечивается переменным напряжением (A/C), подаваемым по центральному и внешнему проводникам коаксиального кабеля. Сначала переменное напряжение ИДП не превышало 30 В, но позднее, когда по экономическим соображениям в качестве центрального проводника коаксиального кабеля стали использовать плакированный медью алюминиевый провод вместо сплошного медного, перешли на напряжение питания 60 В. Во-первых, сопротивление плакированного медью алюминиевого проводника выше, чем просто медного, а во-вторых само по себе энергопотребление выросло. В современных кабельных сетях наблюдается рост потребляемой мощности, связанный с общим усложнением структуры усилителей, использованием перестраиваемых усилителей модульной конфигурации с наращиваемыми функциями и с подключением к сети интерфейсных устройств дополнительных служб (кабельной телефонии, передачи данных).

Требования к питанию отдельных модулей любого комплекса оборудования можно найти в технической документации, предоставленной производителем. Из нее можно выяснить, какая максимальная мощность и ток требуется для данного устройства.

Документация должна включать требования к питанию всех модулей, которые в конечном счете могут быть установлены на данном усилителе, даже если некоторые модули, например, усилительные модули обратного канала, первоначально не были подключены. Система питания сети должна обеспечивать мощность питания, адекватную полной нагрузке каждой усилительной станции, т.е. мощность, достаточную для подключения всех модулей, которыми может быть оборудована данное устройство. Действительное энергопотребление устройства будет зависеть от различных факторов, таких как тип установленного блока питания, наличие импульсной стабилизации, подаваемое на блок питания входное напряжение.

Глава 21. Питание кабельной сети

Как уже было сказано, отличие дистанционного питания от местного состоит в том, что в первом случае энергия источника питания поступает к оборудованию через радиочастотный вход (по коаксиальному кабелю). Питание может подаваться, по необходимости, на входной или выходной или на оба радиочастотных порта усилителя с помощью его внутренних соединений. Можно использовать различные радиочастотные интерфейсы, имеющие вставки для подключения напряжения питания. Для подачи питания в кабельную сеть коаксиальный кабель может быть физически пропущен через блок сетевого питания, но более часто используются встраиваемые блоки питания, принцип подключения которых к кабелю показан на рис. 21.2. Здесь используется устройство вставки питания или так называемый инсертер. Для инсертера обеспечивается изоляция по переменному току питания, поэтому он имеет строго нормированные потери передачи на радиочастоте.

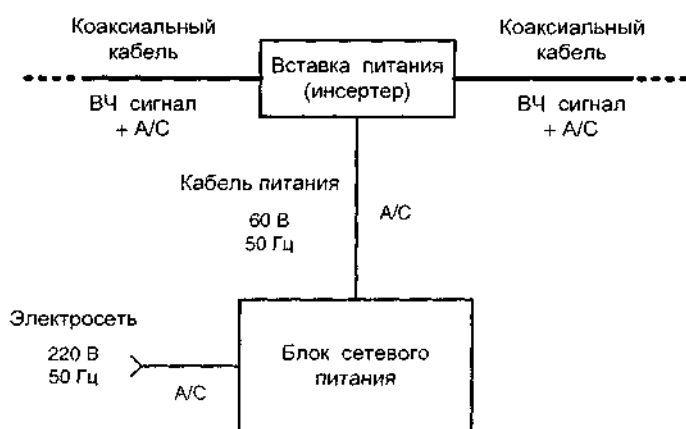


Рис. 21.2. Питание по коаксиальному кабелю

Сетевой источник питания кабельной системы нельзя путать с индивидуальным встроенным источником питания, который является составной частью любого усилительного устройства и уже непосредственно снабжает электроэнергией все его внутренние модули. Индивидуальный источник питания потребляет переменное напряжение (обычно 60 В) из коаксиального кабеля, выпрямляет его, выделяя постоянную составляющую, и стабилизирует. Затем постоянное напряжение питания (около 24 В) поступает с его выхода на все подключенные модули данного усилительного устройства, обеспечивая достаточную для них рабочую мощность. Рассмотрим структурную схему усилителя, изображенную на рис. 21.3. Здесь показан способ подачи питания к активным внутренним модулям усилительного устройства, в данном примере усилитель содержит только один активный модуль – усилительный модуль прямого канала. Как видно по этому рисунку, переменное (АС) напряжение питания 60 В подается по коаксиальному кабелю вместе с радиочастотным сигналом на вход усилителя. Чтобы далее это напряжение не распространилось по всем блокам усилителя, на входе установлен АС-ответвитель, который разделяет высокочастотный информационный сигнал и напряжение питания, отводя его в низкочастотную цепь. В низкочастотной цепи находится внутренний источник питания усилителя, на вход которого и поступает переменное напряжение питания.

21.2. Источники питания активных устройств

Затем с выхода внутреннего источника питания выпрямленное и стабилизированное напряжение питания (DC) подается на усилительный модуль. На выходе усилителя установлен аналогичный ответвитель, включенный в обратном направлении, который замыкает цепь питания. На схеме усилителя отдельно изображены низкочастотная цепь питания и путь передачи ВЧ сигнала.

Таким образом, каждое активное устройство, подключенное в коаксиальную кабельную линию передачи, имеет два независимых пути передачи энергии. По одному пути передается ВЧ энергия сигнала, который имеет частоту выше 5 МГц, а по второму, низкочастотному, пути передается энергия питания с частотой 50 Гц.

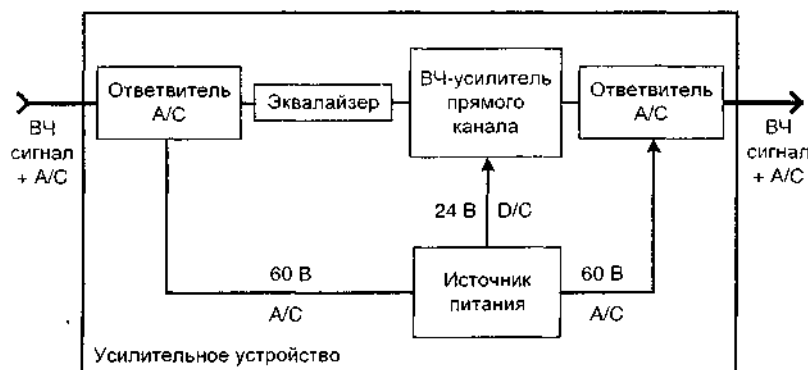


Рис. 21.3. Питание усилительного устройства

Это разделение цепей питания и передачи сигнала называется развязкой по питанию или изоляцией по низкой частоте. Это означает, что те элементы усилительного устройства, которым не требуется питание, не будут находиться под напряжением 60 В, что повышает безопасность и надежность устройства. С помощью цепи развязки по низкой частоте тока питания усилители блокируются от питания более чем одним источником. Если цепь питания и (или) источник питания любого активного устройства в коаксиальной кабельной линии будут повреждены, то никакого влияния на передачу ВЧ сигнала это не окажет и работа последующих усилителей в сети будет возможна при автоматическом включении резервного питания.

Перед использованием конкретного оборудования нужно внимательно изучить его спецификацию, предоставленную производителем. В спецификации источника питания должно быть опубликовано следующие нормативные показатели:

- среднеквадратическое значение входного переменного напряжения и частоту переменного напряжения питания (50/60 Гц);
- суммарная потребляемая мощность полной конфигурации усилительного устройства или потребляемая мощность каждого активного модуля;
- потребляемый постоянный ток и напряжение для каждого активного модуля (для усилителей модульной конструкции);
- допустимая пульсация входного переменного напряжения.

Особенность имеют усилители с низким напряжением питания, меньшим, чем 60 В. Эти усилители при входном напряжении 60 В или около того нужда-

Глава 21. Питание кабельной сети

ются в ручной регулировке или действии автоматической цепи настройки блока питания усилителя, чтобы поддерживать правильное выходное напряжение. В некоторых усилителях обеспечивается грубая настройка, которая называется "локальной" или "удаленной".

Эта настройка позволяет использовать усилитель в тех точках системы, где напряжение питания выше или ниже 60 В, и поддерживать постоянное и стабильное напряжение 24 В на выходе блока питания для правильного функционирования всех модулей усилительного устройства. В зависимости от модели и типа усилителя, существует некоторый уровень входного переменного напряжения питания, который собственный блок питания усилителя воспринимает как пороговый. Если входное напряжение блока питания ниже этого порога, то рабочие показатели модулей усилительного устройства могут не соответствовать их нормативным значениям, приведенным в спецификации, и показатели качества передачи в окончании системы могут быть нарушены. Как известно, нагрузка, на которую подается низкое входное напряжение, потребляет большой ток, который ток может создать неприемлемо большое падение напряжения в некоторой части системы питания.

21.3. Падение напряжения в кабельной сети

Расчет падения напряжения питания в кабельной сети выполняется на основе данных о полном сопротивлении цепи выбранного коаксиального кабеля по постоянному току и потребляемой мощности усилительных устройств (или эквивалентного сопротивления нагрузки) на каждом усилительном участке секции питания. Поскольку питание в любую точку сети подается через коаксиальный кабель по центральному и внешнему его проводникам, то расчет системы питания сети следует проводить исходя из значений сопротивления обоих проводников и расстояния, на которое передается питание, т.е. протяженности секции дистанционного питания. Для вычисления падения напряжения можно воспользоваться законом Ома, причем в расчетах будут использоваться среднеквадратические значения токов и напряжений питания.

Согласно закону Ома, если ток I проходит через цепь, имеющую ограниченное сопротивление по постоянному току R , то в этой цепи происходит падение напряжения, равное $I \cdot R$. Допустим, электрическая цепь содержит в качестве нагрузки резистор с сопротивлением 18 Ом, к которому приложено напряжение 10 В. Следовательно, ток через резистор будет составлять около 0,55 А. В этом примитивном расчете пренебрегли сопротивлением соединительных проводов, идущих от источника напряжения к резистору. Рассмотрим тот же случай, но с учетом того, что при известном расстоянии между нагрузкой и источником каждый соединительный провод имеет сопротивление 1 Ом, как показано на рис. 21.4.

Общее сопротивление цепи теперь равно 20 Ом, поэтому ток в цепи составляет 0,5 А. Если теперь вычислить напряжение E , приложенное непосредственно к нагрузке (падение напряжения на нагрузке), то получится, что оно составляет $0,5 \text{ А} \cdot 18 \text{ Ом} = 9 \text{ В}$. Падение напряжения на соединительных проводах, таким образом, составит 1В.

Тот же результат можно получить и другим путем. При токе 0,5 А можно вычислить падение напряжения на соединительных проводах, полное резистивное сопротивление которых равно 2 Ом:

21.3. Падение напряжения в кабельной сети

$$U = IR = 0,5 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 1 \text{ В},$$

где U – падение напряжения на проводах, I – ток в цепи, R – сопротивление проводов.

Следовательно, напряжение, в действительности приложенное к нагрузке, будет на 1 В меньше напряжения источника питания (10 В), т.е. 9 В. Как и следовало ожидать, ток через нагрузку составит $9\text{В} / 18 \text{ Ом} = 0,5 \text{ А}$.

В кабельной сети встречаем аналогичную ситуацию за исключением того, что кабельная сеть включает несколько параллельных нагрузок, соединенных значительными длинами кабеля, и каждый кабель имеет значительное сопротивление по постоянному току.

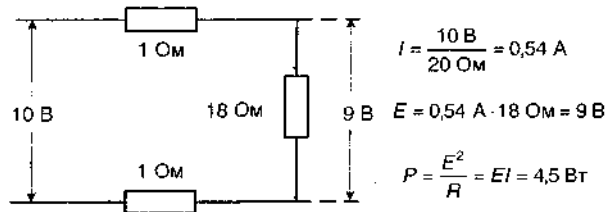


Рис. 21.4. Падение напряжения в цепи

На рис. 21.5 представлена эквивалентная схема кабельной сети с тремя нагрузками, представляющими собой эквиваленты усилительных станций сети КТВ и тремя участками соединительных проводов, являющихся эквивалентами отрезков коаксиального кабеля длиной по 500 м каждый. Напряжение E_0 – это напряжение источника дистанционного питания. Предположим, что на всех трех усилительных участках используются одинаковые усилители и кабели одной марки, поэтому сопротивления кабельного контура R_k и потребляемые мощности нагрузок P_n всех участков равны. Значения сопротивлений в этом примере выберем произвольно.

Допустим, что рабочие показатели каждого из трех усилителей будут соответствовать нормативным значениям (источник питания будет вырабатывать стабильное постоянное напряжение 24 В), если ко входу его источника питания приложено напряжение не менее 40 В и не более 60 В, а ток, отводимый в нагрузку, при этом составляет 0,5 А. Допустим, что центральный проводник коаксиального кабеля имеет сопротивление 0,2 Ом на 100 м, тогда сопротивление внешнего проводника на каждом участке между двумя нагрузками будет равно 1 Ом. Допустим, что внешний проводник коаксиального кабеля имеет сопротивление 0,6 Ом на 100 м, тогда сопротивление центрального проводника на каждом участке между двумя нагрузками будет равно 3 Ом. Поскольку ток протекает через оба проводника, полное сопротивление соединительного кабеля на каждом участке между двумя нагрузками будет равно сумме сопротивления внешнего проводника (1 Ом) и сопротивления центрального проводника (3 Ом), т.е. 4 Ом.

Предположим, что сеть питается от источника с напряжением $E_0 = 60 \text{ В}$, как показано на рис. 21.4. Если в каждую нагрузку отводится ток 0,5 А ($I_{n1} = I_{n2} = I_{n3}$), то при условии равенства сопротивлений R_k и равенства потребляемых мощностей P_n на всех трех участках через кабель, соединяющий источник питания с усилителем $Ус1$, должен течь ток $I_{k1} = 1,5 \text{ А}$. При данном сопротивлении этого

Глава 21. Питание кабельной сети

кабеля 4 Ом и токе 1,5 А падение напряжения на первом участке соединительного кабеля составит:

$$U_1 = 1,5 \text{ A} \cdot 4 \text{ Ом} = 6 \text{ В.}$$

Тогда напряжение E_1 , приложенное ко входу усилителя Ус1 будет на 6 В меньше напряжения источника (60 В), т.е. составит 54 В. Поскольку определили, что входное напряжение источника питания усилителя может находиться в пределах от 40 до 60 В, то спецификация в этой точке соблюдается.

Рассмотрим участок эквивалентной цепи, соединяющий усилитель Ус1 с усилителем Ус2. Полное сопротивление кабельной цепи здесь, как и на первом участке, равно 4 Ом, но ток в этой цепи составляет 1 А. Этот ток далее делится поровну между оставшимися двумя нагрузками R_n – усилителем Ус2 и усилителем Ус3. Падение напряжения в соединительном кабеле между усилителем Ус1, который теперь можно рассматривать как источник напряжения E_1 для оставшейся части сети, и усилителем Ус2 равно:

$$U_2 = 1 \text{ A} \cdot 4 \text{ Ом} = 4 \text{ В.}$$

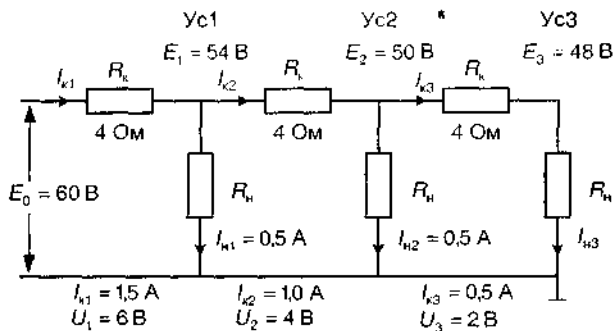


Рис. 21.5. Падение напряжения в кабельной сети

Следовательно, напряжение E_2 , приложенное к усилителю Ус2, будет на 4 В меньше напряжения источника питания второго кабельного участка (54 В), т.е. составит 50 В. Это же напряжение подается на вход третьего кабельного участка, являясь новым напряжением источника питания для оставшейся части сети, которая включает последний усилитель Ус3 и обслуживающий его кабель. На этом участке полное сопротивление кабеля тоже равно 4 Ом, но ток в цепи усилителя Ус3 равен 0,5А. Падение напряжения на третьем соединительном кабеле составит:

$$U_3 = 0,5 \text{ A} \cdot 4 \text{ Ом} = 2 \text{ В.}$$

Следовательно, напряжение E_3 , приложенное к усилителю Ус3, будет на 2 В меньше напряжения источника питания третьего участка, т.е. будет равно 48 В. Получается, что и в этой точке спецификация по входному напряжению источника питания усилителя не нарушается. Как мы видим, напряжение на входах всех трех усилителей выше 40 В (54 В, 50 В и 48 В), поэтому рабочие показатели всех усилителей в этом примере будут соответствовать нормативным значениям.

На этом простом примере был показан принцип расчета падения напряжения в кабельной сети. Секция питания реальной кабельной сети включает более трех усилительных участков, поэтому возникает задача правильного рас-

21.3. Падение напряжения в кабельной сети

положения источника внутри секции питания. Нагрузка R_n на каждом усилительном участке магистральной линии рассчитывается с учетом транкового и всех фидерных усилителей на этом участке. Рассмотрим пример, представленный на рис. 21.6, где один ИДП обеспечивает питание магистральной секции с десятью усилительными станциями (хотя на практике такой вариант, возможно, встречается не часто). Эквивалентная схема электропотребления для этого случая будет выглядеть подобно схеме на рис. 21.5, но будет иметь не три, а десять контуров. Место включения ИДП соответствует точке схемы, к которой приложено напряжение питания E_0 . Как и ранее, предположим, что допустимо входное напряжение источника от 40 до 60 В, сопротивление кабельного контура между каждой парой магистральных усилителей равно 3 Ом и все потребляемые мощности одинаковы. Выберем источник с переменным выходным напряжением 60 В и силой тока 12 А и посмотрим, что произойдет, если расположить источник питания не в средней точке этой секции, а между усилителями 6 и 7.

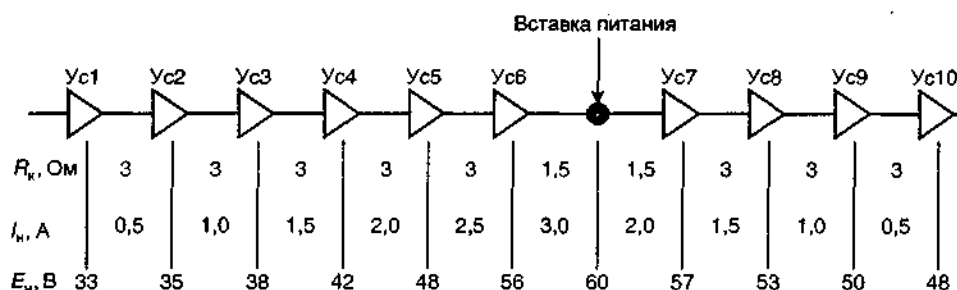


Рис. 21.6. Неправильное расположение источника

Общий ток, потребляемый усилителями 7, 8, 9 и 10, составляет 2 А. Ток от источника к усилителю 7 течет через цепь с сопротивлением 1,5 Ом, что создает падение напряжения 3 В. В результате напряжение, приложенное к усилителю 7, равно 57 В. Не будем подробно пояснять вычисление напряжений, приложенных к усилителям 8, 9 и 10. Результаты показаны на рисунке и наихудшее значение 48 В, полученное для усилителя 10, является приемлемым. В другом направлении от источника, к усилителю 6, течет ток 3 А через сопротивление 1,5 Ом. Это создает падение напряжения 4,5 В, значит, к усилителю 6 будет приложено напряжение 55,5 В. Напряжения, приложенные к последующим усилителям от 5 до 1, вычислены аналогично и показаны на рисунке. Заметим, что на усилители 1, 2 и 3 подается напряжение менее 40 В, что, согласно спецификации, не может обеспечить нормальную работу усилительного оборудования, следовательно, положение ИДП выбрано неправильно.

Если переместить точку вставки питания в середину секции между усилителями 5 и 6, как показано на рис. 21.7, то питание будет распределено правильно, поскольку напряжения, приложенные ко всем усилительным станциям, будут не менее 40 В. Оказалось, что напряжение источника питания полностью распределено по системе, т.е. у нас не остается возможности для питания еще хотя бы одного усилителя, кроме этих десяти. Напряжение источника питания распределилось не только на питание усилителей, но и на падение напряжения во всех соединительных кабелях.

Глава 21. Питание кабельной сети

Заметим, что в обоих примерах суммарный ток, потребляемый всеми десятью усилителями, составляет только 5 А, при допустимом выходном токе источника 12 А, поэтому ограничений по току не было. Такой пример обычно можно встретить в условиях реальных систем, где используются усилители с высоким усилением и расстояния между усилителями относительно велики. В этих условиях источник питания почти неизбежно будет использоваться неэффективно, поскольку его ресурс по току будет расходоваться не полностью. По этой причине иногда бывает трудно организовать эффективную систему питания для протяженной, широко разветвленной распределительной кабельной сети.

Во всех приведенных примерах получена некоторая последовательность напряжений E_i (в последнем примере: 41 В, 43 В, 46 В, 50 В, 56 В, 60 В, 56 В, 50 В, 46 В, 43 В, 41 В) которая представляет собой распределение напряжения источника по секции дистанционного питания. Это распределение и требуется найти при проектировании системы питания кабельной сети. Величину напряжения E_i в системе дистанционного питания магистральной линии, содержащей N усилительных участков, можно найти по следующей рекуррентной формуле:

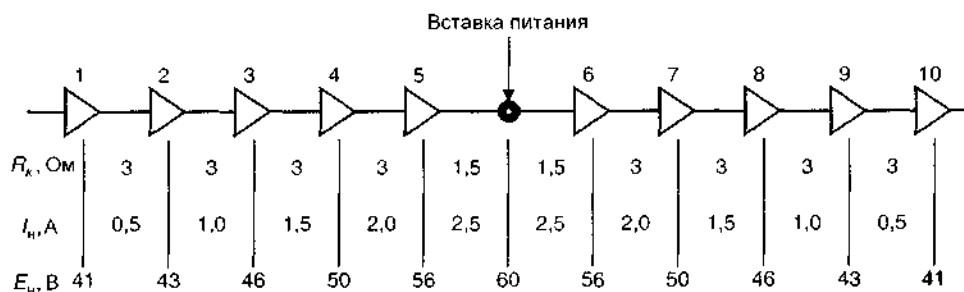


Рис. 21.7. Правильное расположение источника

$$E_i = E_{i-1} - R_{ki} I_{ki}, \quad i = 1 \dots N.$$

В этой формуле R_{ki} – полное сопротивление кабельного контура на i -м усилительном участке; I_{ki} – ток через соединительный кабель i -го усилительного участка; E_i – напряжение дистанционного питания в точке включения i -й нагрузки.

В более общем виде то же самое можно выразить иначе – через токи, потребляемые нагрузками на всех усилительных участках секции или сопротивления нагрузок:

$$E_i = E_{i-1} - \sum_{n=i}^N R_{kn} I_{kn} = E_{i-1} - \sum_{n=i}^N \frac{R_{kn} E_n}{R_{kn}}, \quad i = 1 \dots N.$$

В этой формуле R_{ki} – полное сопротивление соединительного кабеля на i -м усилительном участке, I_{ki} – потребляемый ток в нагрузке i -го усилительного участка, R_{ni} – полное эквивалентное сопротивление нагрузки на i -м усилительном участке (учитывающее потребляемые мощности транкового и всех фидерных усилителей), E_i – напряжение дистанционного питания в точке включения i -й нагрузки. Если записать последнее выражение для каждой точки секции дистанционного питания, в которой включена нагрузка, получится система из N

уравнений. Решив ее при известном E_0 , найдем искомое распределение напряжения питания внутри секции. Решение системы уравнений может быть затруднено, если все мощности нагрузки и все сопротивления кабельного контура различаются. Это может иметь место, например, когда в магистрали устанавливаются разнотипные усилители, имеющие разные потребляемые мощности, или, когда длины соединительного кабеля между магистральными усилителями сильно различаются. Как правило, первое встречается редко, так как разработчик стремится к унификации оборудования, а второе вполне возможно в зонах нетиповой или нерегулярной застройки. Расчеты во всех приведенных примерах для упрощения были сделаны в предположении, что во всех точках питания потребляемые мощности равны между собой и сопротивления соединительных кабелей также равны между собой.

Заметим, что эта система уравнений может и не иметь решения. Это означает, что реализация системы дистанционного питания при данных E_0 , $R_{ли}$, $R_{кп}$ невозможна – питание всех точек обеспечить не удастся – и нужно либо выбрать усилители с меньшей потребляемой мощностью, либо взять кабель с меньшим сопротивлением контура, либо уменьшить количество точек питания в данной секции (напряжение источника питания фиксировано). Таким образом, величины $R_{ли}$, $R_{кп}$, N являются параметрами системы и путем их изменения можно определить оптимальную протяженность секции питания. Среднее значение потребляемой мощности магистрального усилителя составляет 30 Вт и может меняться в небольших пределах, а в сумме с мощностями фидерных усилителей участка может составить более 100 Вт. Значение сопротивления кабельного контура меняется значительно – примерно от 0,5 до 6 Ом на 100 м. Расчеты показывают, что при средних значениях параметров на магистрали удастся обеспечить питание не более четырех-пяти усилителей, тем самым возможность дистанционного питания усилителей от точки питания головной станции сильно ограничена. Учитывая, что магистральные каскады могут включать более 10 усилителей, разработчик должен будет установить для питания магистрали несколько ИДП и каждый из них подключить к надежной электросети. Однако, абсолютно надежных электросетей не существует, поэтому желательно обеспечить резервирование для каждого ИДП.

21.4. Расположение источников питания в системе

Источники дистанционного питания должны периодически располагаться вдоль всей кабельной структуры, и правильность выбора мест их расположения диктуется вышеназванными техническими требованиями, к которым относятся протяженность кабельной структуры, падение напряжения в ней и необходимость обеспечения питания самих источников от надежной электросети. Кроме этого имеет значение оборудование места расположения источника. В кабельной системе источники питания монтируются либо в помещении, либо на стальной мачте (в подвесных сетях) на специальной стойке в корпусе, предохраняющем от неблагоприятного влияния внешней среды. Каждая точка, в которой устанавливается источник, должна иметь легкий доступ к общественной электросети (~220 В) для снабжения источника электроэнергией. Для монтажа источника питания стойка должна быть соответствующим образом подготовлена и надежно защищена от проникновения посторонних лиц. Должны быть соблюдены все меры безопасности согласно стандарту EN-50083 или

Глава 21. Питание кабельной сети

другому стандарту кабельных сетей. Предполагаемые места расположения источников питания наносятся на карту сетевых маршрутов, после чего, в процессе проектировании системы питания выбранное расположение уточняется путем расчетов и, если необходимо, осмотра на месте, и, когда разработчик убеждается в правильности расположения, оно вносится в проект.

Поскольку классической схемой построения распределительной кабельной сети является схема с древовидной топологией, называемая транк-фидер (или магистраль-субмагистраль), рассмотрим на ее примере порядок расчета системы питания. На рис. 21.8 показана небольшая часть типичной сети транк-фидер.

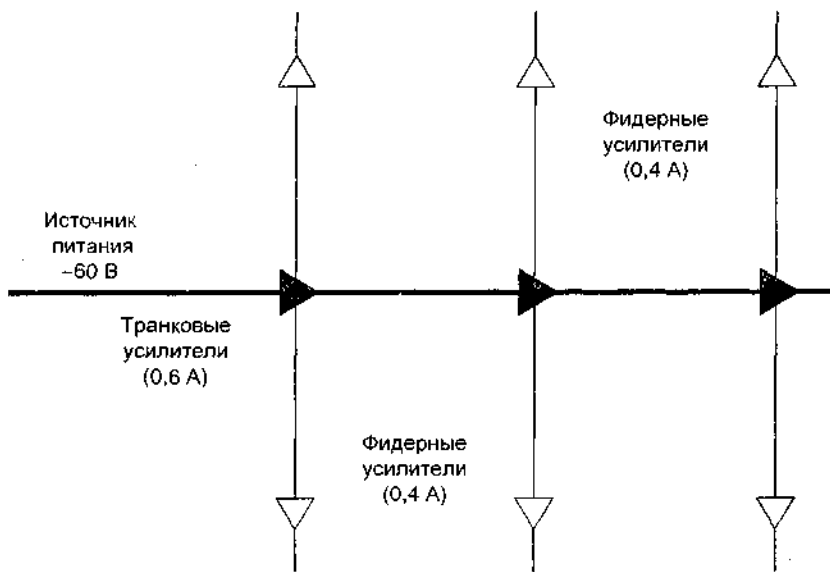


Рис. 21.8. Секция питания сети транк-фидер

В представленном примере секция кабельной сети включает три транковых/мостовых усилителя, каждый из которых включен в комбинации с двумя фидерными/линейными усилителями (по одному в каждом ответвлении), питающимися от той же точки. На практике могут встретиться случаи с двумя фидерными усилителями в каждом ответвлении, но с точки зрения методики расчета это не принципиально.

Предположим, что каждый транковый усилитель потребляет ток $0,6\text{ А}$, а каждый фидерный усилитель потребляет ток $0,4\text{ А}$. Кроме того, считаем, что минимальное установленное спецификацией переменное напряжение питания для любого усилителя составляет 40 В . Расположение усилителей было установлено ранее в процессе проектирования магистрального маршрута, поэтому не составит труда из предыдущих расчетов определить длины кабелей, соединяющих транковые усилители с фидерными, и длины кабелей, соединяющих транковые усилители друг с другом. На основании этих данных нужно решить, где следует установить источник переменного напряжения 60 В для питания рассматриваемой секции, включающей три транковых и шесть фидерных усилителей.

21.4. Расположение источников питания в системе

Расчет системы питания начнем с самого дальнего усилителя, которым в этом случае является линейный усилитель в верхнем правом углу рисунка. Допустим, по данным спецификации на применяемый в ответвлениях кабель установили, что полное сопротивление кабельной цепи (внутреннего и внешнего проводников) для данной длины ответвления равно 2 Ом. При прохождении тока 0,4 А через кабель с сопротивлением 2 Ом произойдет падение напряжения $0,4\text{А} \cdot 2\text{Ом} = 0,8\text{В}$.

Как известно, приложенное к фидерному усилителю напряжение должно быть равно как минимум 40 В, а так как падение напряжения в кабеле, питающем фидерный усилитель третьего участка, составляет 0,8 В, то к точке расположения транкового усилителя должно быть приложено по крайней мере 40,8 В. На рис. 21.9 обозначены требования по питанию этого усилителя. Сопротивление кабеля, потребляемый ток и падение напряжения указаны в прямоугольнике слева от кабеля, к которому они относятся.

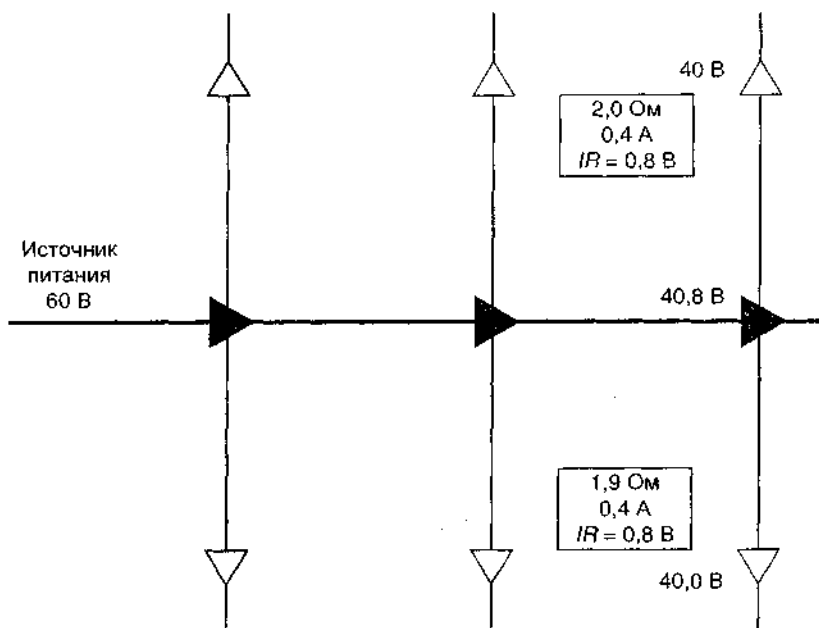


Рис. 21.9. Питание фидерных усилителей третьего участка

Теперь убедимся, что на другой фидерный усилитель, питающийся от данного транкового усилителя, также будет поступать не менее 40 В. Длину второго отрезка соединительного кабеля также возьмем из предыдущих расчетов и аналогично вычислим сопротивление его цепи. Допустим, его сопротивление составляет 1,9 Ом. Второй фидерный усилитель тоже потребляет ток 0,4 А, поэтому падение напряжения в соединительном кабеле ответвления равно $1,9\text{Ом} \cdot 0,4\text{А} = 0,76\text{В}$, что округляется до 0,8 В. Следовательно, при напряжении питания на транковом усилителе 40,8 В напряжение питания на фидерном усилителе в действительности будет равно 40 В. Расчетные значения для второго фидерного усилителя третьего участка показаны также на рис. 21.9. Поскольку напряжения питания всех усилителей третьего участка соответствуют норме, расчет системы питания можно продолжить.

Глава 21. Питание кабельной сети

Перейдем ко второму усилительному участку. Допустим, полное сопротивление кабеля между вторым и третьим транковыми усилителями, длина которого была определена на этапе проектирования магистрали, равно 2 Ом. Поскольку на третьем усилительном участке, с которого начинался расчет, каждый из двух линейных усилителей потребляет ток 0,4 А, а один транковый усилитель потребляет 0,6 А, то общий ток, потребляемый третьим участком системы, будет равен 1,4 А. При таком токе и сопротивлении соединительного магистрального кабеля 2 Ом падение напряжения между вторым и третьим транковыми усилителями будет равно:

$$U_3 = IR = 1,4 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 2,8 \text{ В}.$$

Как уже установлено, для питания третьего транкового усилителя требуется 40,8 В, значит, на второй транковый усилитель необходимо подать по крайней мере 43,6 В для компенсации падения напряжения 2,8 В. На рис. 21.10 отражены эти результаты.

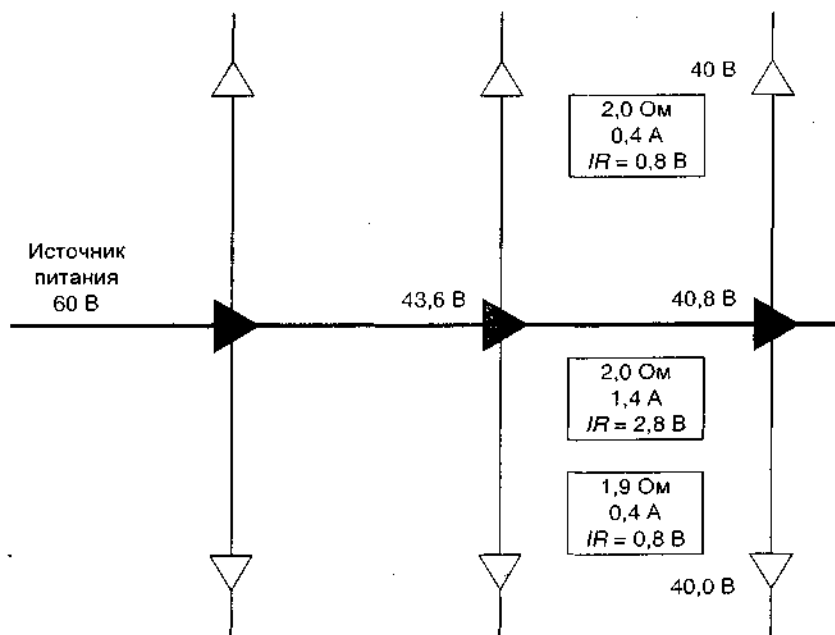


Рис. 21.10. Питание транкового усилителя второго участка

Теперь нужно проверить, хватит ли напряжения 43,6 В для питания обоих фидерных усилителей, подключенных к точке питания второго транкового усилителя. Допустим, в результате аналогичных расчетов получено, что падения напряжения на фидерных кабелях, соединенных с этой точкой составляют 1,3 и 1,4 В, что обеспечивает подачу напряжений питания к этим блокам 42,3 В и 42,2 В соответственно. Этого достаточно для питания усилителей в соответствии с их спецификациями, поэтому расчет системы можно продолжить. Результаты этого шага расчета показаны на рис. 21.11.

На рис. 21.12 представлены результаты расчета первого участка, имеющего сопротивление кабельного контура 2,2 Ом.

21.4. Расположение источников питания в системе

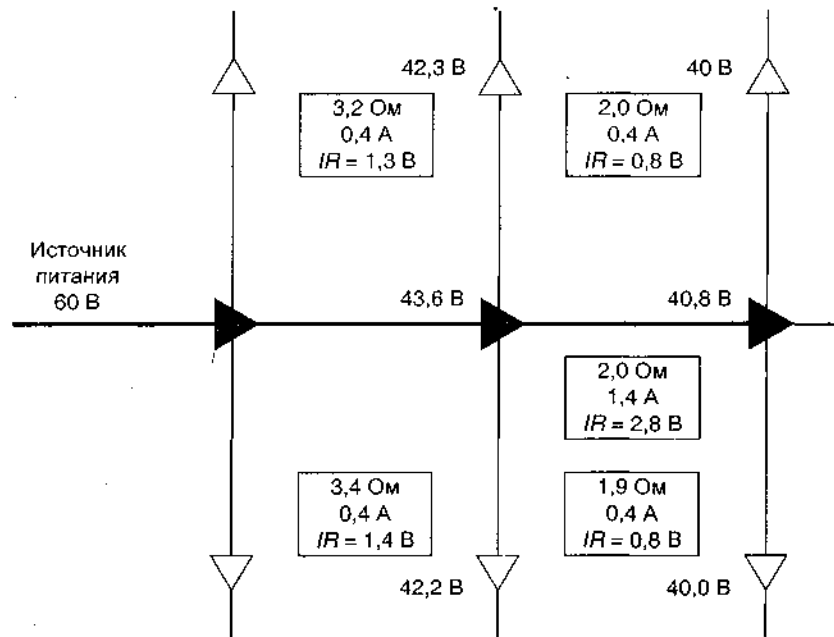


Рис. 21.11. Питание фидерных усилителей второго участка

Потребляемый ток на этом участке кабеля составляет 2,8 А. Он находится как суммарный ток, потребляемый двумя транковыми усилителями (2·0,6 А) и четырьмя фидерными усилителями (4·0,4 А), расположенными после этого участка.

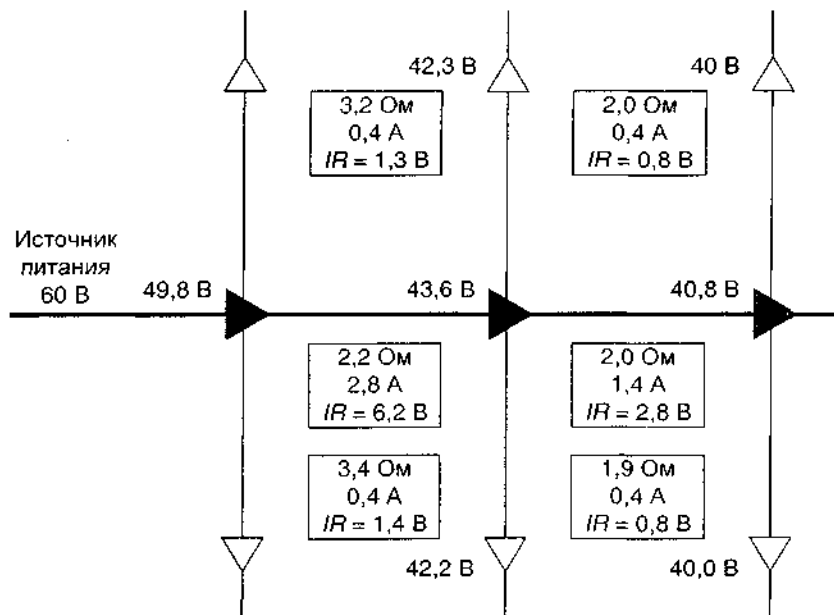


Рис. 21.12. Питание транкового усилителя первого участка

Глава 21. Питание кабельной сети

Таким образом, падение напряжения на втором участке транкового кабеля составляет:

$$U_2 = IR = 2,8 \text{ A} \cdot 2,2 \text{ Ом} = 6,16 \text{ В.}$$

Это значение округляется до 6,2 В. На всю систему (т.е. на первый транковый усилитель) следует подать по крайней мере 49,8 В, чтобы компенсировать падение напряжения 6,2 В в кабеле и обеспечить напряжение 43,6 В на следующем транковом усилителе.

Теперь можно убедиться в том, что напряжения 49,8 В, подаваемого в точку подключения первого транкового усилителя будет достаточно для питания и тех двух фидерных усилителей, которые подключены к этой точке. На рис. 21.13 представлены данные по сопротивлениям кабельной цепи, потребляемому току и результаты расчетов падения напряжения на первом участке.

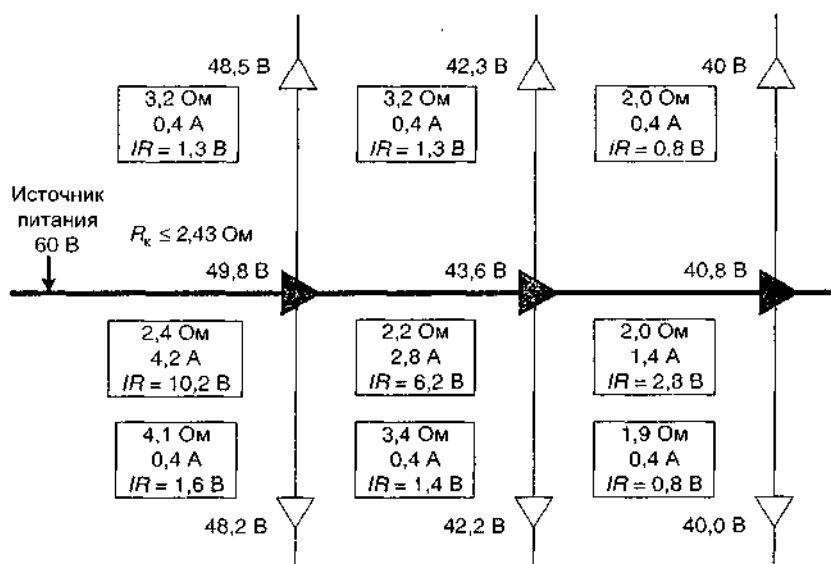


Рис. 21.13. Питание фидерных усилителей первого участка

Видно, что оба фидерных усилителя обеспечены напряжением питания, которое заведомо выше минимального 40 В, даже при том, что один из этих усилителей питается посредством соединительного кабеля, сопротивление цепи которого выше других и равно 4,1 Ом.

Таким образом, установлено, что для правильной организации системы питания рассматриваемой секции необходимо подать на первый транковый усилитель переменное напряжение не менее 49,8 В. Осталось решить, на каком максимальном расстоянии от точки включения первого транкового усилителя можно расположить источник питания системы, чтобы обеспечить эти 49,8 В.

Переменное напряжение источника равно 60 В, следовательно, можно допустить падение напряжения в кабеле между источником питания и первым транковым усилителем не более 10,2 В:

$$U_1 = E_0 - 49,8 \text{ В} = 10,2 \text{ В.}$$

21.4. Расположение источников питания в системе

Ток через этот кабель представляет собой суммарный ток, потребляемый всей секцией, т.е. шестью фидерными усилителями ($6 \cdot 0,4 = 2,4$ А) и тремя транковыми усилителями ($3 \cdot 0,6 = 1,8$ А), что в общем составляет 4,2 А. Применив закон Ома, найдем максимально допустимое сопротивление данного кабеля:

$$R_k = U_1 / I_1 = 10,2 \text{ В} / 4,2 \text{ А} = 2,43 \text{ Ом.}$$

Поскольку из спецификации магистрального кабеля известно значение сопротивления контура на 100 м, то, исходя из полученного значения его сопротивления 2,43 Ом, легко вычислить его действительную длину, которая и будет максимальным расстоянием от источника питания до первого усилителя. Заметим, что можно расположить источник питания ближе, чем это необходимо, но нельзя превысить это расстояние, не нарушив требования по питанию всей системы, что привело бы к падению качества обслуживания.

Резюме

В сетях КТВ применяется дистанционное и местное питание активных устройств. Местное питание подается от местной электросети в точке включения устройства. В дистанционной системе питания один ИДП обеспечивает питание целой секции кабельной сети, включающей, как правило, несколько усилительных участков. Существенным требованием к питанию усилителя является то, чтобы ему была обеспечена мощность, достаточная для питания любого встроенного модуля, который может входить в его состав. При проектировании системы питания это требование необходимо учитывать, так как подключение модулей может происходить не в один момент, а в ходе эксплуатации сети, и потребляемая мощность в этом случае будет расти постепенно.

Показателями, влияющими на эффективность питания секции, являются сопротивление кабельного контура и потребляемая мощность активных устройств. На их основе рассчитывается падение напряжения вдоль кабельной структуры и определяется возможная протяженность секции питания. Надежность системы питания является важнейшим показателем работоспособности кабельной сети. В магистральной линии с дистанционным питанием вставка питания должна быть сделана в точке с надежным энергоснабжением.

Проектирование системы питания представляет собой менее сложную задачу, чем разработка кабельной структуры, хотя неправильное распределение питания по активному оборудованию кабельной структуры может оказать неблагоприятное влияние на работоспособность сети и увеличить эксплуатационные расходы. С другой стороны, если проект системы питания излишне консервативен, то источники питания будут использоваться неэффективно по выходному току или напряжению и стоимость первоначального строительства сети и последующей эксплуатации сети получится выше, чем ожидалось. Проектирование системы питания требует проведения множества вычислений и обычно выполняется с помощью специального программного обеспечения, использование которого не требует знания методики расчета, однако, очень важно, чтобы разработчик понимал, каким образом энергия питания распределяется по сети.

Глава 22

ПРОКЛАДКА И ЗАЩИТА КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

Эта глава содержит сведения о способах прокладки кабеля при строительстве кабельных сетей. Рассматриваются два способа прокладки – подвесная и грунтовая. Выбор способа прокладывания кабеля определяется экономическими соображениями, местными географическими условиями и степенью развития телекоммуникационной проводной инфраструктуры. Затем рассматриваются меры электрической и механической защиты сетей кабельного телевидения. К мерам электрической защиты относится в первую очередь эквипотенциальное соединение и заземление частей кабельной сети, а также предотвращение контакта сети с другими кабельными структурами, проложенными параллельно. Под механической защитой подразумевается защита кабеля и приборов от попадания влаги и коррозии, предотвращение чрезмерного растяжения кабеля, защита антенных мачт от повреждений при сильной ветровой нагрузке.

22.1. Подвесная прокладка кабеля

Долгое время в кабельных сетях использовалась, и используется по сей день, подвесная (надземная) прокладка кабеля, т.е. прокладка по воздуху путем подвешивания кабеля на вертикальных опорах или мачтах. Этот способ прокладки широко распространен из-за своей простоты и применим в областях обслуживания, имеющих подобную развитую проводную инфраструктуру. Речь идет о том, что кабель распределительной сети КТВ часто располагают на опорах существующих подвесных кабельных линий, например, общественной телефонной сети или электросети.

Телевизионный кабель обычно прокладывают выше телефонного кабеля и ниже кабеля электросети, если такое совмещение целесообразно и возможно при условии обеспечения установленного стандартами безопасного свободного промежутка между данными кабельными линиями. При этом нужно учитывать провисание кабеля. Если между кабелем сети КТВ и существующими кабельными линиями невозможно создать достаточный промежуток, например, из-за малой высоты опоры или из-за перегруженности опоры другими линиями, придется проложить какую-то из линий заново. Такая работа требует реконструкции всей опорной сети и, разумеется, оплачивается ее инициатором, которым в данном случае является оператор сети КТВ.

Оператор сети КТВ может построить собственную опорную структуру с разрешения местных проектных органов. В таком случае у него не возникнет проблем с размещением кабеля на опоре, но возрастут расходы. Если же оператор сети кабельного телевидения собирается использовать опорные структуры, принадлежащие местным телефонным компаниям, компаниям распределения электроэнергии или каким-то другим, то он должен будет заключить с владельцем договор об аренде опорной структуры и внести в него пункт об оплате, в

котором оговаривается, что арендная плата за установленный период взимается только за те опоры, по которым проложена его сеть. Кроме арендной платы договор об аренде включает требование к оператору, гласящее, что он должен брать на себя все расходы, связанные с подготовкой и возможной реконструкцией опорной структуры при прокладке своего кабеля. Перед вводом в эксплуатацию новой кабельной сети коммунальная служба инспектирует всю опорную структуру на соблюдение стандартов безопасности параллельной прокладки нескольких кабельных линий. Инспекция также относится к подготовительным работам и оплачивается кабельным оператором.

Маршрут опорной подвесной линии передачи, как правило, следует маршрутам городских улиц и автомагистралей, повторяя их изгибы и резкие повороты. Все опоры, через которые линия проходит не в прямом направлении, а с изгибом, необходимо крепить растяжками. Обычно это делается с помощью закопанного в землю анкера, к которому крепятся растяжные тросы. Анкеры и растяжки также требуются в тех местах, где оканчивается кабельная структура, т.е. в глухом ответвлении кабеля (так называемое анкерное крепление на концевой опоре).

При подвесной прокладке используются прочные поддерживающие элементы, необходимые для того, чтобы кабель не подвергался натяжению или деформации. Чаще всего поддерживающим элементом является стальной трос, который также называется несущим элементом. Напомним, что существуют кабели со встроенным несущим тросом, впрессованным в общую с ним полимерную оболочку, и кабели без несущего троса. Кабель с собственным тросом специально приспособлен для подвесной прокладки, а для обычного кабеля в случае подвесной прокладки необходим внешний трос. Трос может быть как цельным, изготовленным из одного стального прута, так и скрученным из нескольких жил (многожильным).

Характеристикой троса является его прочность, которая определяется как допустимое натяжение или максимальная сила, приводящая к его разрыву. Функция троса заключается не только в том, чтобы удерживать вес самого кабеля, но также и предохранять кабель от излишней нагрузки при сильных порывах ветра или обледенении, поэтому и рассчитывается прочность троса должна с учетом всех этих факторов. Обледенение кабеля вследствие налипания мокрого снега – проблема, особенно актуальная для северных районов. Обледенение приводит к увеличению натяжения кабеля и его провисанию из-за роста весовой нагрузки.

Ветер также увеличивает нагрузку на кабель и способствует его провисанию. В отсутствии несущего троса или при его недостаточной прочности возможно чрезмерное растяжение кабеля или его разрыв. Разрыв, хотя и повлечет кратковременное прекращение обслуживания, легко обнаруживается и устраняется. Чрезмерное растяжение кабеля может стать даже более серьезной проблемой, чем разрыв, так как в растянутом состоянии центральный провод коаксиального кабеля подвергается сильному напряжению, что приводит к изменению его электрических свойств и, соответственно, росту потерь сигнала. Как правило, эта проблема тяжело локализуется и устраняется.

Натяжение троса зависит от таких факторов как расстояние между опорами, вес кабеля и дополнительная нагрузка на трос, обусловленная ветром и льдом. Поскольку физические свойства металла, из которого сделан трос, в значительной мере зависят от температуры, то нужно принимать во внимание и этот

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

параметр. Для правильного выбора троса (или кабеля с тросом) разработчик, исходя из этих факторов, определяет допустимую норму натяжения троса. Чем больше длина пролета и выше ожидаемая нагрузка за счет ветра и льда, тем большую прочность на разрыв должен иметь несущий трос. Разумеется, допустимое натяжение троса при полной нагрузке должно быть гораздо меньше его предельной прочности на разрыв, иначе трос не будет выполнять своих функций.

При прокладке кабеля с внешним несущим тросом трос крепится непосредственно к каждой опоре с помощью болтов. Затем трос натягивается так, чтобы его провисание на участке между соседними опорами было допустимым по отношению к уже проложенным на этих опорах линиям (электропередачи или телефонным). Как только несущий трос закреплен и натянут, параллельно ему протягивается коаксиальный или оптический кабель. Затем вдоль троса проходит обмоточная машина и проволокой спирально обвивает кабель и трос, создавая на всем маршруте единую, механически прочную кабельную структуру.

В тех точках, где должно быть установлено оборудование, как и на промежуточных опорах, проволочная обмотка оканчивается и закрепляется на несущем тросе. На коротком промежутке кабель отделяется от троса, на котором делается петля. Затем обмотка кабеля продолжается до следующей опоры или до следующей точки расположения оборудования. За исключением источников питания, все оборудование и приборы системы кабельного телевидения снабжены зажимами или хомутами для крепления их прямо к несущему элементу, поэтому вертикальное расстояние между линиями на опоре намеренно ограничивается. Источники питания слишком громоздки и тяжелы, чтобы монтировать их тем же способом, поэтому они обычно привинчиваются болтами к самой опоре.

Подвесная прокладка кабеля с собственным несущим элементом выполняется подобным образом за исключением того, что в этом случае нет необходимости в предварительном протягивании троса, поскольку несущий элемент встроен в саму структуру коаксиального или оптического кабеля. Так как для прокладки такого кабеля требуется только одна операция, стоимость и трудоемкость прокладки значительно снижается. Однако, кабели с несущим тросом не очень хорошо подходят для поддержки второго параллельного кабеля, прокладываемого позднее. Кабель с собственным несущим тросом находит широкое применение в фидерной структуре распределительной сети, особенно там, где требуется проложить сеть через какое-либо препятствие. На первом этапе прокладки кабель и его несущий трос одновременно прикрепляются к опоре, а на втором этапе соединяются участки кабеля, что позволяет выполнить работу в два прохода и минимизировать тем самым трудозатраты.

Между надземными способами прокладки металлического парно-витого (телефонного) кабеля, коаксиального кабеля и волоконного кабеля различий почти нет. Оптический кабель может, как и два другие типа кабеля, поддерживаться собственным несущим тросом или может быть прикреплен к внешнему несущему тросу с помощью обычного связывающего механизма. Однако, вследствие малых размеров и относительно небольшого веса волоконные кабели могут, кроме того, поддерживаться тросами уже проложенных на тех же опорах телефонных или коаксиальных кабельных линий. В корпусах терминальных приборов практически всегда предусматривается некоторый излишек для раз-

22.1. Подвесная прокладка кабеля

мещения дополнительных волокон, поэтому никаких вспомогательных средств для их прокладки не понадобится.

22.2. Прокладка кабеля в грунте

Грунтовая прокладка кабеля является таким способом прокладки, при котором кабель располагается под поверхностью земли. Существует два варианта грунтовой прокладки. В первом варианте (траншейной прокладки) кабель протягивается внутри полужесткого пластикового кабелепровода или защитного короба, проложенного в траншее под землей независимо от кабеля. Кабелепровод представляет собой сборную многосекционную конструкцию, состоящую из пластиковых труб, соединенных торец в торец. Несколько секций трубы выстраиваются между оконечными точками кабельными структуры, после чего в них протягивается кабель. Во втором варианте (прокладке с прямым заглублением) под землей располагается только сам кабель без защитного кабелепровода. Каждый способ имеет свои ограничения в применении и свои достоинства, но при том и другом способе прокладки необходимо контролировать натяжение кабеля и избегать образования на нем петель и изломов. Растяжение кабеля приводит к отклонению его электрических параметров от нормативных значений, а излом или перегиб кабеля становится точкой нерегулярности, в которой резко возрастают потери на отражении.

Рассмотрим способ грунтовой прокладки в кабелепроводе. Внутренний диаметр кабелепровода должен быть достаточным, во-первых, чтобы обеспечить свободный доступ к кабелю для его обработки, а, во-вторых, чтобы натяжение кабеля данного размера и предела прочности на разрыв не привело к его повреждению. Первые попытки при прокладывании длинных кабельных отрезков заключались в ручном протягивании кабеля через промежуточные отверстия в кабелепроводе. Недостаток этого способа заключался в том, что напряжение, которое в действительности передавалось длинному отрезку кабеля при его протягивании, было трудно точно определить и поддерживать постоянным в ходе такой операции. Один из возможных подходов состоит в протягивании серии коротких участков из целого длинного кабеля без деления его на короткие отрезки, как показано на рис. 22.1. Непрерывный отрезок кабеля большой длины, намотанный на катушку, протягивается через два участка в четыре стадии с помощью лебедки. После протягивания первого участка запас кабеля остается на временной катушке, пока не будет протянут второй участок, поэтому в окончании первого участка необходимо иметь запас кабеля для протягивания второго. Для этого используется методика перемотки кабеля "восьмеркой". После завершения первого участка лебедка перемещается к третьей точке структуры и на втором участке оставшийся кабель протягивается с помощью приспособления, расположенного в промежуточной точке в виде восьмерки. Протягивая кабель таким способом, следует избегать недопустимого натяжения длинного участка кабеля.

Усовершенствование этой методики позволяет более простым способом контролировать натяжение кабеля с помощью натяжного барабана (capstan), установленного в промежуточной точке протягивания кабеля, как показано на рис. 22.2. На натяжном барабане, радиус которого должен быть больше допустимого радиуса изгиба кабеля, наматывается несколько витков кабеля. Если кабель испытывает напряжение после точки расположения барабана, то витки кабеля затягиваются вокруг вала барабана.

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

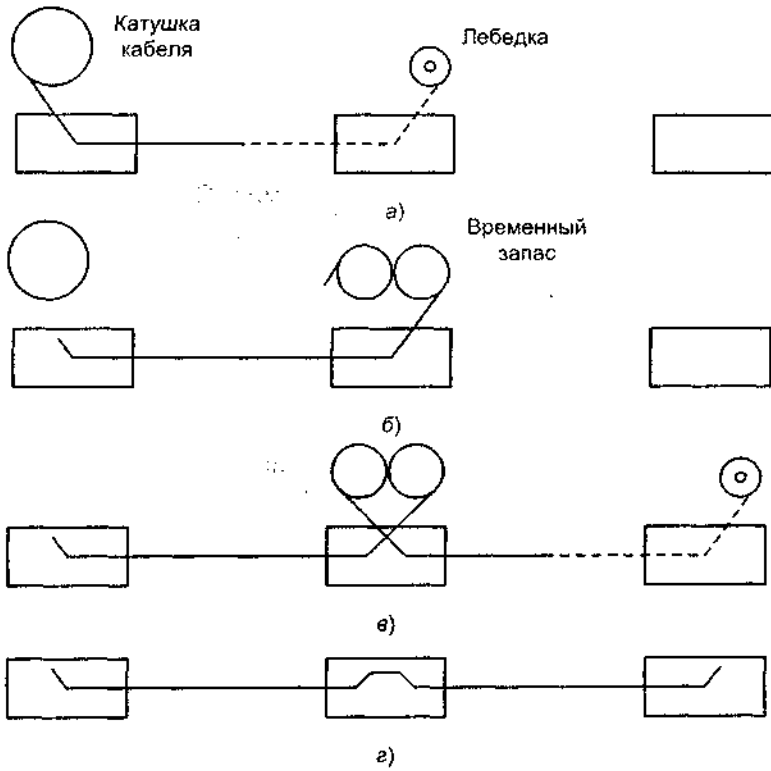


Рис. 22.1. Протягивание коротких участков "восьмеркой":
 а – процесс протягивания первого участка; б – протягивание первого участка завершено;
 в – процесс протягивания второго участка; г – протягивание второго участка завершено

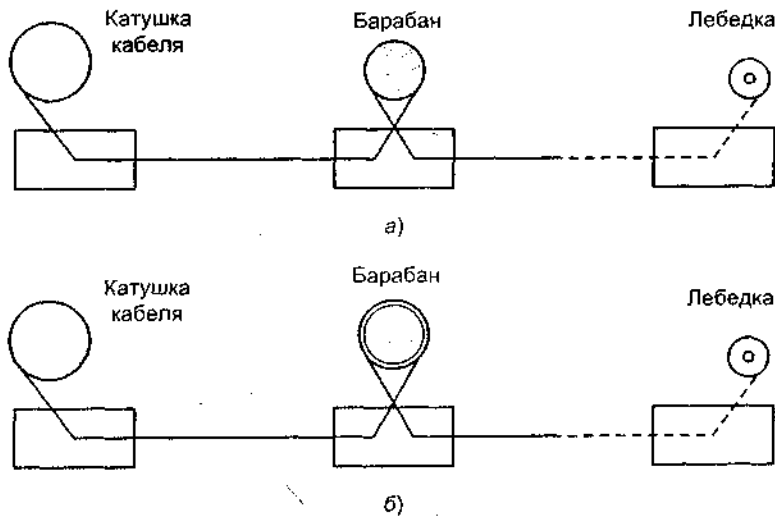


Рис. 22.2. Протягивание кабеля с помощью натяжного барабана:
 а – натяжение прикладывается; б – натяжение отсутствует

Барабан передает силу натяжения кабелю, находящемуся между самим барабаном и катушкой с кабелем. В результате протягивание двух или более коротких участков можно выполнить как одну операцию. Поскольку барабан восстанавливает силу натяжения кабеля после снятия первоначального напряжения, то такой механизм подтягивает кабель только когда это необходимо. Таким образом, сила натяжения кабеля регулируется автоматически. Для дополнительного уменьшения натяжения кабеля при грунтовой прокладке могут использоваться смазочные материалы.

Порядок укладки кабеля в грунт может быть различным. Кабель может быть предварительно помещен внутрь защитного кабелепровода, после чего сборная конструкция, состоящая из кабеля с кабелепроводом, помещается в землю как единый элемент. По другой методике пластиковый кабелепровод укладывается в землю отдельно, а затем кабель протягивается сквозь него через отверстия методом "восьмерки" или с помощью натяжного барабана. В еще одной методике используется щелевой кабелепровод, по всей длине которого проходит сплошная продольная прорезь. Такой кабелепровод укладывается в грунт длинным непрерывным отрезком, после чего волоконный кабель помещается в него через щель. В любом случае в земле выкапывается узкая траншея нужной глубины для укладки кабелепровода с кабелем или без него, а затем траншея заполняется землей. Это довольно дорогой способ, так как прокладка выполняется в три прохода вдоль кабельного маршрута – выкапывание траншеи, размещение в ней кабеля и восстановления прежней поверхности земли. Однако, траншейная прокладка является единственным возможным способом, если кабель размещается в кабелепроводе.

Альтернативным способом грунтовой прокладки кабеля является его прямое заглубление с помощью кабелеукладчика. Кабелеукладчик протаскивает по поверхности земли резец или плуг и одновременно с этим подает кабель через направляющий башмак резца, укладывая кабель в образующееся углубление. Резец может настраиваться таким образом, чтобы создавать ниже уровня грунта несколько больше свободное пространство, чем необходимо при данном диаметре кабеля, для гарантированного размещения всех изгибов кабеля. Прокладка с помощью кабелеукладчика является менее дорогим методом, поскольку вся работа выполняется за один проход, и нет необходимости в последующем выравнивании поверхности земли. Совместно с кабелеукладчиком должно использоваться оборудование для измерения натяжения кабеля.

При грунтовой прокладке как траншейным, так и прямым способом, возникают одинаковые проблемы, связанные с необходимостью восстановления прежнего дорожного покрытия улиц, автомобильных дорог и тротуаров после прокладки кабеля. По этой причине прокладка кабеля в грунт является очень дорогой процедурой, но иногда она неизбежна. В тех местах маршрута кабельной сети, где процесс прокладки кабеля в грунт невозможно продолжать, например, при пересечении реки или автомагистрали или железной дороги, приходится использовать местные подземные коммуникации (метро, городскую канализацию и прочее) или прокладывать собственный тоннель под препятствием, что обойдется гораздо дороже любого другого способа. Самым дешевым решением в такой ситуации вероятнее всего окажется обход препятствия путем подвесной прокладки. В местах, где грунтовая кабельная структура переходит в подвесную кабельную структуру, необходимы участки вертикально проложенного кабеля. На этих участках кабель также защищается специальным кабелепроводом.

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

Способы прокладки оптического кабеля радикально не отличаются от способов прокладки коаксиального кабеля, но им присущи свои проблемы. Пожалуй, ключевое отличие в организации волоконно-оптической сети от коаксиальной состоит в том, что затухание в оптическом кабеле очень мало, благодаря чему становится возможной прокладка сверхдлинных кабельных участков. На ранних этапах развития оптических сетей, когда их разработкой занимались специалисты в области построения традиционных коаксиальных сетей, были проведены аналитические исследования существующих методик прокладки кабельных структур, как надземных, так и подземных, с целью выбора методики, наиболее подходящей для прокладки оптического кабеля. Традиционные способы были признаны пригодными, но обнаружились некоторые особенности, объясняемые физическими свойствами оптического волокна. Свойства волокон, связанные со свойствами материалов, из которых они изготовлены, делают прокладку и соединение волокон несколько более сложной задачей, чем аналогичные действия с коаксиальными кабелями. Оптические кабели имеют меньшие размеры и вес и являются более хрупкими, чем металлические коаксиальные кабели. Фактором, оказывающим наибольшее влияние на методику прокладки и соединения волоконного кабеля, является малый предел прочности волокна на разрыв. За прошедшее время опыт строительства волоконно-оптических сетей увеличился многократно, поэтому сейчас разработчику не приходится прибегать к каким-либо экстраординарным решениям и можно пользоваться готовыми решениями.

22.3. Электрическая защита кабельной сети

Согласно требованиям действующих стандартов к безопасности прокладки кабельных сетей любая кабельная структура нуждается в электрической защите. Одной из причин, по которой эта защита необходима, является подверженность ударам молнии и связанные с этим наведенные импульсные токи большой силы. Другой причиной может быть пробой какого-либо источника высокого напряжения. Кроме этого, в подвесной структуре существует опасность контакта с другими сетями, проложенными параллельно, например, с сетью электропередачи, а также с прочими проводящими деталями и частями. Безопасным расстоянием считается минимальное расстояние между проводящими частями в пределах предохраняемого пространства, на котором между ними не может возникнуть искра. Однако, физический контакт не единственная проблема. В проводниках коаксиального кабеля могут возникать наведенные продольные токи вследствие электромагнитной индукции от параллельного силового кабеля электросети.

При наличии нескольких кабельных сетей на одной опорной структуре разность потенциалов между ними может стать опасной для обслуживающего персонала в случае неосторожного контакта с электропроводящими частями структуры. Опасность для абонентов заключается в том, что сеть питания и сеть кабельного телевидения электрически связаны между собой через бытовую телевизионную технику (телевизоры, видеоманитофоны), и при одновременном контакте с металлическим корпусом, на котором присутствует высокое напряжение, и точкой низкого потенциала, например, батареей, может возникнуть опасный для человека ток. Опасность для оборудования состоит в возможном выходе из строя при поступлении на его вход большого тока.

Способом обеспечения безопасности абонентов и персонала сети, а заодно и защиты оборудования, является заземление всех электропроводящих элементов распределительной кабельной структуры. Чем меньшее сопротивление имеет заземление, тем более качественно оно выполнено. Внешний проводник коаксиального кабеля, металлический несущий элемент и все оборудование кабельной сети заземляется в нескольких точках на протяжении всей распределительной сети. Точки заземления телевизионной кабельной сети электрически соединяются с аналогичными точками электросети и телефонной сети везде, где это возможно. Прямое соединение точек заземления позволяет снять разность потенциалов между частями системы или разными системами, устранить наведенные токи и предотвратить возможную утечку тока, обезопасив тем самым персонал. Тот факт, что передающая среда волоконно-оптического кабеля является диэлектриком, не меняет ситуации, если этот кабель имеет металлические элементы (повышающие прочность или несущие элементы), и требует таких же мер защиты от возникающей разности потенциалов. Проблема заземления отсутствует только для кабеля, который полностью состоит из диэлектрика (несущий элемент волоконно-оптического кабеля может быть изготовлен не только из металла, но и из непроводящего материала). В отсутствие заземления на проводниках и металлических оплетках кабелей, корпусах и металлических частях активного и пассивного оборудования возникают опасные напряжения. Как для оборудования, так и для человека опасно не само по себе напряжение, а электрический ток, протекающий от одного потенциала к другому.

Защита оборудования абонентских станций также необходима. Все сервисные ответвления, обслуживающие абонентские станции, заземляются и связываются с другими точками заземления в доме абонента. На тех абонентских терминалах, где установлено только пассивное оборудование (не потребляющее электроэнергию от сети) считается достаточным заземление, выполненное с помощью заземляющего блока через внешний проводник коаксиального кабеля. На тех абонентских терминалах, где установлены конверторы и другие активные приборы потребляющие энергию от электросети, выполняется заземление самих приборов в обязательном соответствии с указаниями стандартов по технике безопасности. Кабель и оборудование домашней распределительной сети привязываются к имеющейся в здании системе заземления (эквипотенциальное заземление). Использование общего заземления в здании является наиболее правильным, поскольку ни одно заземление не может быть выполнено идеально, и при использовании двух независимых систем заземления между ними неизбежно присутствует разность потенциалов, хотя бы незначительная. Следовательно, в случае, например, попадания молнии в здание в кабеле будет наведен сильный ток, который потечет через электрические цепи телевизора и в лучшем случае может привести к их повреждению, а в худшем – вызвать пожар. Ответственность за материальный ущерб при неправильно выполненном соединении и заземлении будет нести кабельный оператор.

Меры электрической защиты были недостаточно освещены в старом отечественном ГОСТ. Первая часть нового европейского стандарта EN-50083 целиком посвящена технике безопасности. В ней подробно описаны способы защиты от молнии, способы заземления и защиты от контакта всех частей кабельной структуры, приведены требования к выполнению заземления и даны определения всех деталей системы заземления.

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

Согласно определению эквипотенциальное соединение – это такое электрическое соединение, которое приводит электрические потенциалы различных проводящих деталей, частей приборов и кабелей к одному значению. Эквипотенциальное заземление (заземление с эквипотенциальным соединением) выполняется с помощью эквипотенциальной связующей штанги и пластины – металлической конструкции, к которой могут быть присоединены или приварены проводящие детали, оплетки электрического силового или телекоммуникационного кабеля и другие металлические части. К проводящим частям здания относятся все выступающие металлические предметы, которые могут обеспечивать прохождение тока (водопроводные трубы, лестницы, направляющие рельсы лифта, вентиляционные и кондиционные трубы, а также арматурные конструкции). Эквипотенциальное заземление состоит из эквипотенциальной пластины, заземляющего терминала, заземляющего электрода, эквипотенциального связующего проводника, заземляющего проводника, защитного провода и земляного окончания. Заземляющий терминал – это точка соединения, с помощью которой осуществляется заземление электропроводящих корпусов оборудования. Заземляющий электрод – это электропровод или группа электропроводов, обеспечивающая непосредственное электрическое соединение электропроводящих корпусов оборудования с землей. Эквипотенциальным связующим проводником называется проводник, обеспечивающий выравнивание потенциалов проводящих частей и деталей. Заземляющий проводник – это проводник, соединяющий главный заземляющий терминал с заземляющим электродом. Защитным называется провод, необходимый для защиты от возможности поражения электрическим током при случайном прикосновении к выступающим проводящим частям, посторонним проводящим деталям, главному заземляющему терминалу, заземляющему электроду или заземленной точке источника. Земляное окончание – это часть заземляющей системы, рассеивающая электрический ток в земле.

Общие требования к выполнению эквипотенциального заземления включают следующие пункты:

- металлические корпуса оборудования должны быть соединены и заземлены, например, как показано на рис.22.3;
- в тех местах, где соединение невозможно, но необходимо избежать балансирующих токов между кабельными распределительными системами и конструкциями в зданиях, нужно использовать гальваническую развязку;
- если балансирующие токи в проводниках превышают максимально допустимые значения, указанные производителем используемых в сети кабелей и разъемов, следует применить гальваническую развязку;
- в тех местах, где установлена гальваническая развязка между секциями сети, для устранения паразитных токов, возникающих вследствие разности потенциалов, следует соединять наружные проводники каждой изолированной секции с заземляющей системой;
- наружные проводники коаксиальных кабелей, входящих и выходящих из здания, следует присоединять к общей эквипотенциальной штанге, либо к корпусам оборудования (абонентские фидерные кабели не требуют таких соединений, если применяется гальваническая развязка или полностью изолированные розетки);
- при снятии распределительного оборудования или кабеля необходимо избегать утечки токов на абонентском оборудовании из-за появления высоких напряжений в разомкнутой цепи кабеля;

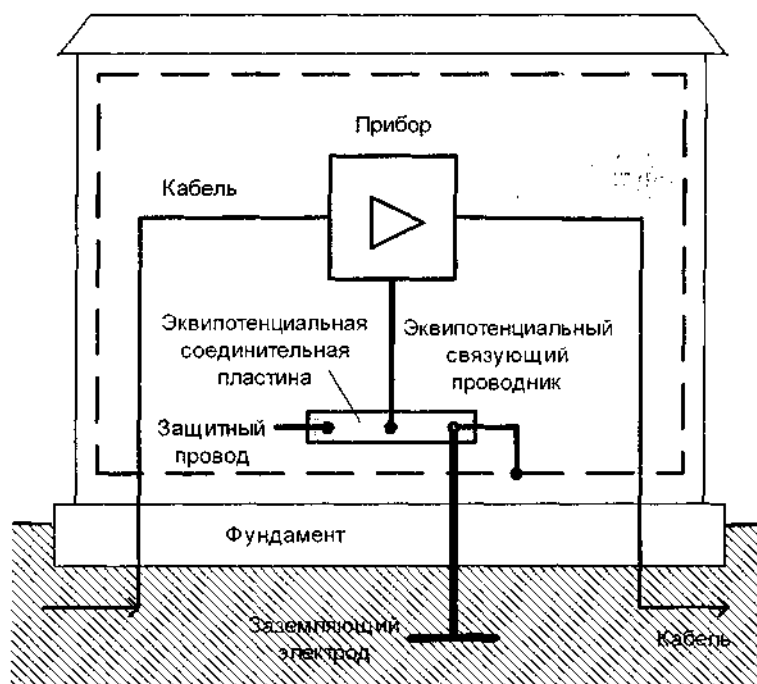


Рис. 22.3. Пример эквипотенциального заземления

- эквипотенциальный соединительный проводник, соединяемый с основным заземляющим терминалом, должен быть механически прочным и иметь площадь поперечного сечения меди не менее 4 мм^2 ;
- каждое соединение заземляющего проводника с заземляющим терминалом должно быть выполнено с помощью зажимов и надежных сварных или паяных соединений;
- все металлические корпуса, кожухи, стойки и монтажные конструкции должны снабжаться наружными заземляющими зажимами (фидерные усилители мощности, ответвители и точки ввода могут быть также оснащены заземляющими зажимами).

Эквипотенциальное заземление необходимо для сетей, прокладываемых внутри зданий, но в тех случаях, когда кабельные распределительные сети прокладываются снаружи, на тех же опорах, что и сеть электропитания, можно применить и обычное заземление. О защите кабельной структуры от контакта с близлежащими системами распределения электроэнергии было сказано в предыдущей главе.

Следует заметить, в части заземления абонентской точки стандарт EN-50083 предусматривает для подключения абонентского оборудования к сети электропитания использование трехконтактных вилок и розеток, имеющих свой контакт заземления. Подразумевается, что трехконтактная вилка всегда включается в соответствующую розетку с заземлением, поэтому использование двухполюсных сетевых шнуров для подключения блоков питания с трехконтактным разъемом создает проблемы. К кабельной распределительной сети абонентское оборудование может быть подключено напрямую или с помощью абонентских

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

розеток сети КТВ, которые и должны обеспечивать необходимую защиту. В точках, где абонентские розетки не используются, защита может быть обеспечена на выходе абонентского ответвителя с помощью изолирующих конденсаторов или трансформаторов с изолированными проводниками. Внутренний проводник должен выдерживать испытательное постоянное напряжение 2120 В не менее одной минуты и сохранять при этом сопротивление изоляции не менее 3 МОм (это требование считается выполненным, если утечка тока в течение времени испытания не превышает 0,7 мА).

Абонентская розетка должна быть разработана так, чтобы исключить возникновение неисправностей при подключении оборудования и возможность поражения людей электрическим током. Среднеквадратическое значение утечки тока частоты 50 Гц не должно превышать 8 мА при подаче напряжения со среднеквадратическим значением 230 В. Используются четыре типа абонентских розеток, обеспечивающих различные степени защиты от поражения электрическим током. Первый тип – полностью изолированная розетка – имеет изолирующие компоненты, связанные с внутренними и наружными проводниками коаксиальных соединений. В качестве изолирующих компонентов могут выступать высоковольтные конденсаторы или трансформаторы с двумя обмотками. Полуизолированная розетка содержит изолирующие компоненты, связанные только с внутренним проводником коаксиального соединения, а защита обеспечивается эквипотенциальным соединением наружного проводника абонентского фидера. В этом случае сопротивление по постоянному току между наружным проводником соединения и ближайшей точкой эквипотенциального соединения должно быть не более 5 Ом. В качестве изолирующих компонентов могут выступать также высоковольтные конденсаторы или трансформаторы с двумя обмотками. Неизолированная розетка с защитным элементом не содержит никакой изоляции, но имеет защитный элемент. Защита обеспечивается посредством эквипотенциального соединения между внутренним и наружным проводниками коаксиального соединения. Защитным элементом может быть радиочастотная катушка, сопротивление которой по постоянному току должно быть не более 1 Ом, а сопротивление по постоянному току между наружным проводником коаксиального соединения и ближайшей точкой эквипотенциальной системы должно быть менее 5 Ом. Наконец, неизолированная розетка без защитного элемента не содержит никаких изолирующих компонентов или защитного элемента, а защита обеспечивается эквипотенциальным соединением. Эти розетки применяются, когда требуется обратное электропитание от абонентского оборудования, причем, от других розеток их необходимо изолировать.

Мачты и антенные комплексы головной станции системы кабельного телевидения требуют особого внимания к электрической защите и заземлению, поскольку они возвышаются над другими структурами и, следовательно, более подвержены ударам молнии. Меры защиты от разрядов молнии предусмотрены для любых антенных систем, включая спутниковые антенны. Применяются защитные процедуры, разработанные специально для антенных систем. Все компоненты антенной системы должны быть разработаны таким образом, чтобы они могли выдержать разряды молнии без опасности возникновения пожара и повреждения несущей конструкции антенной системы. Запрещается устанавливать антенны на крышах, покрытых горючими материалами. Антенные кабели и заземляющие проводники не должны прокладываться в тех местах, где хранятся горючие материалы или где могут накапливаться взрывчатые газы. В

зданиях, используемых для размещения оборудования головной станции, оборудуется своя система защиты от молний (LPS). Мачта антенны, являющаяся металлическим сооружением, должна быть соединена с системой защиты здания от молний или непосредственно с землей. Наружные проводники всех коаксиальных кабелей, идущих от антенны, должны быть соединены с мачтой через эквипотенциальный соединяющий медный проводник, имеющий площадь поперечного сечения не менее 4 мм^2 . При этом следует избегать образования петель. Заземляющие проводники должны устанавливаться прямо и вертикально, так, чтобы обеспечить наиболее короткий путь тока к заземляющей системе. Для индивидуальных систем или систем коллективного приема небольшого масштаба, например, в пределах одного здания, из-за невысокой вероятности попадания молнии можно обойтись и без системы защиты от молнии, если это позволяют местные правила.

Заземляющая система антенного комплекса должна обеспечиваться посредством либо соединения с системой защиты от молний на здании, либо соединения с системой заземления на здании, либо независимого заземления. Последний способ требует соединения как минимум с двумя горизонтальными электродами длиной не менее 5 м и одним вертикальным электродом длиной не менее 2,5 м, закопанным на глубину не менее 0,5 м на расстоянии не менее 1 м от стены. Минимальная площадь поперечного сечения каждого электрода должна составлять 50 мм^2 для медного и 80 мм^2 для железного электрода. В качестве заземляющих электродов могут использоваться также имеющиеся металлические структуры здания, например, бетонно-арматурные структуры или другие компоненты, входящие в землю или в фундамент здания, размеры которых находятся в указанных пределах. Заземляющий проводник должен быть выполнен из жесткого проводника с площадью сечения не менее 16 мм^2 для меди, 25 мм^2 для алюминия и 50 мм^2 для железа. Имеющиеся металлические компоненты здания также могут быть использованы, при условии, что это разрешено местными правилами. Подходящими являются металлические водопроводные трубы и трубы системы отопления, металлические рамы и взаимосвязанная арматура, металлические элементы фасада, если обеспечена их электрическая непрерывность и они надежно укреплены (сварка, пайка, обжимка, соединение болтами или винтами). Исключается использование защитных заземляющих и нейтральных проводников источника электропитания, а также наружных проводников любых коаксиальных кабелей.

22.4. Механическая защита кабельной сети

К мерам механической защиты относится предотвращение повреждений кабеля при прокладке, предотвращение попадания влаги в кабель и приборы, предохранение кабелей и разъемов от коррозии, предотвращение провисания и чрезмерного растяжения кабеля при надземной прокладке, защита антенных мачт от излишней ветровой нагрузки. Для предотвращения растяжения кабеля, как уже было сказано, применяется несущий трос (или кабель со встроенным тросом), для правильного выбора которого необходим расчет нагрузки на него в реальных условиях эксплуатации.

Защита кабеля от повреждений при прокладке обеспечивается осторожным обращением с ним и точным выполнением этой процедуры с соблюдением всех правил, определенных для кабеля каждого типа. Всегда нужно избегать

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

образования петель, изломов и передавливания кабеля. Передавливание особенно опасно, так как после сдавливающего воздействия проводник деформируется, что приводит к росту отраженной энергии. В первый момент полиэтиленовая оболочка принимает форму вмятины, но вскоре она восстанавливается, поэтому позднее место деформации будет трудно обнаружить и поврежденный кабель может быть использован при прокладке сети. Практически все здесь зависит от умения и профессионализма технического персонала.

Неблагоприятные погодные условия довольно сильно сказываются на состоянии и работоспособности кабельной сети. Подвесная кабельная структура, находящаяся все время на открытом воздухе подвержена воздействию крайних температур, налипанию снега и льда, сильных ветров. Как правило, для этого способа прокладки выбирается кабель с несущим тросом. Подвесной структуре может потребоваться и дополнительная защита от повышенной влажности воздуха и высокой концентрации активных веществ в атмосфере промышленных районов, но обычно она не обеспечивается – плохая защищенность надземных сетей компенсируется низкой первоначальной стоимостью их прокладки. Кабель, проложенный в грунте, менее подвержен разным механическим повреждениям, однако, он испытывает разрушающее действие проникающей в кабель влаги и химической коррозии, может быть поврежден грызунами. Следовательно, подземные сети в большинстве случаев также требуют дополнительной защиты. Еще один недостаток грунтовой прокладки в том, что кабель нужно выводить выше уровня грунта для установки усилителей и других приборов, а для этого необходимы специальные защитные приспособления, например, цокольные корпуса. Полную механическую защиту кабельной структуры не удастся гарантировать ни при каких условиях, кабель будет нуждаться в регулярной замене, и продлить срок службы структуры можно только удачным выбором кабелей и качественным выполнением соединений кабелей и приборов.

Немаловажно и качество разъемов. Количество разъемов в крупных кабельных сетях очень велико, поэтому также велика вероятность того, что причиной нарушений в работе сети являются именно разъемы. В больших и средних сетях, особенно на магистралях, рекомендуется использовать только качественные разъемы ведущих производителей, имеющие высокие возвратные потери (низкий коэффициент стоячей волны), высокое экранирование и хорошую коррозионную стойкость. Разъемы необходимо подбирать в соответствии с типами используемых кабелей. Разделка разъемов должна выполняться с использованием специального инструмента в строгом соответствии с рекомендациями производителя. При установке разъемов большое значение опять же имеет квалификация технических специалистов.

При любом способе прокладки следует обращать внимание на характеристики компонентов кабеля и на материалы, из которых он изготовлен. В расчет должны приниматься степень экранирования в рабочих условиях, способность передачи тока питания, наличие дополнительных защитных оболочек и срок амортизации кабеля. При производстве современных магистральных кабелей, как правило, используется медный, покрытый алюминием центральный проводник, алюминиевый внешний проводник и вспененный полиэтиленовый диэлектрик. Все эти компоненты имеют свои температурные коэффициенты расширения, которые могут различаться в несколько раз, например, при нагревании объем полиэтилена увеличивается в 7 раз сильнее, чем объем алюминия. Это способствует смещению одного компонента относительно другого и приво-

дит в итоге к деформации кабеля и ухудшению его характеристик. Чтобы предотвратить смещение центральный проводник, диэлектрик, наружный проводник и оболочку скрепляют воедино. Для прокладки магистралей следует выбирать только скрепленные кабели. Скрепление компонентов, кроме того, препятствует проникновению влаги и повышает прочность кабеля. Кабели, прокладываемые под землей, должны иметь различные средства дополнительной защиты в виде вторичных внешних оболочек с наполняющим водозащитным компаундом и армирующими оплеток. Эти средства повышают коррозионную стойкость кабеля, защищая от влияния солей и кислот, присутствующих в почве. Коррозия кабелей и разъемов опасна тем, что в условиях повышенной влажности может привести к частичным потерям металлического экрана, ухудшить контакт в местах соединений кабелей и приборов, снизить степень экранирования, а ухудшение экранирования, в свою очередь, приводит к росту помех и утечкам. Следует учитывать и то, что коррозия кабеля ускоряется при подаче через него напряжения дистанционного питания. Водозащитный компаунд находится между внешней полимерной оболочкой и алюминиевым экраном. В качестве компаунда обычно используется полужидкий синтетический материал, который выполняет сразу две функции – препятствует попаданию влаги на экран, а при незначительных повреждениях оболочки легко проникает в образовавшиеся щели и заполняет их. При надземной прокладке кабеля в качестве компаунда используется пластичный материал, сохраняющий свою консистенцию в широком диапазоне температур. Кабели с антикоррозийной защитой применяются не только при прокладке под землей, но и в других местах с повышенной влажностью, например, в канализации или в подвальных помещениях.

Качество прокладки кабеля и выполнения соединений в абонентских ответвлениях особенно важно, поскольку здесь обеспечивается минимальная защита кабеля, а вместе с тем, согласно статистике до 70 % неисправностей в кабельных сетях приходится на абонентские ответвления. Ремонт и техническое обслуживание абонентских ответвлений является значительной статьей расходов для кабельных операторов. Возможны разные способы прокладки кабеля абонентских ответвлений. Самый простой способ – крепление кабеля пластмассовыми скобами к стене. Недостатками этого способа являются открытость проводки и ее уязвимость. Поскольку диаметр наружного проводника определяет волновое сопротивление, даже незначительное передавливание абонентского кабеля скобой недопустимо, иначе в этой точке возникнет нерегулярность. Следовательно, размер используемых скоб должен строго соответствовать диаметру кабеля, для чего существует широкий ассортимент скоб разного размера. Абонентский кабель может прокладываться в защитном коробе и это, вероятно, оптимальный способ, как по стоимости работы, так и по простоте исполнения и последующего обслуживания. Более того, в одном коробе можно проложить кабели сразу нескольких сетей. Этот способ часто применяется в офисных помещениях. Более сложные и дорогие способы скрытой прокладки, как прокладка под плинтусом и полом, в стене, над подвесным потолком имеют преимущество только с эстетической точки зрения – они не портят внешнего вида помещения. В редких случаях выполняется подвесная протяжка кабеля абонентского ответвления, причем здесь требуется направляющий трос, в отсутствии которого нагрузка на кабель в области соединения повышается и со временем ухудшается экранирование, что ведет к росту наведенных помех. Проблема наводок в абонентском ответвлении очень актуальна,

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

особенно для обратного канала, в котором на этом участке мощность шума возрастает более чем в два раза.

Ключевым фактором механической защиты является защита наружной антенной системы, установленной на головной станции, от излишней ветровой нагрузки. Стандарт EN-50083 предъявляет требования к механической стабильности любой антенной системы, включая спутниковые антенны. Все части антенной системы должны быть сконструированы таким образом, чтобы противостоять максимальной силе ветра без поломок и отрыва компонентов. Основным показателем механической стабильности является изгибающий момент. При проектировании антенны рассчитывают ветровую нагрузку на всю конструкцию и, исходя из нее, определяют изгибающий момент антенной мачты. Стандартом установлено, что для антенных систем со свободной длиной мачты не более 6 м изгибающий момент в точке фиксации не должен превышать 1650 Н·м. Производитель антенны должен указывать ветровую нагрузку антенны и максимальный изгибающий момент мачты в месте фиксации при ветровом давлении 800 Н/м². Фиксированная часть мачты должна составлять не менее одной шестой от ее полной длины. Чтобы мачта при перегрузке не сломалась, конструкция должна быть гибкой. Для этого сталь, из которой изготовлена мачта, должна иметь гарантированный предел расширения и максимальная нагрузка не должна превышать 90 % от предела расширения. Минимальная толщина стенки мачты в области крепления должна составлять 2 мм. В случае если длина мачты более 6 м или ожидается, что изгибающий момент будет превышен, или используется нестандартный способ крепления мачты, следует воспользоваться услугами эксперта, который обследует конструкцию и даст гарантию ее безопасности. Площадка, на которой мачта крепится к зданию (обычно на крыше), должна быть оборудована специальным образом. Местные инструкции могут требовать проверки надежности и этой площадки.

Ветровую нагрузку, действующую на мачту, можно определить по следующей формуле:

$$W = c p A,$$

где W – ветровая нагрузка в Ньютонах, Н; c – коэффициент нагрузки; p – ветровое давление в Паскалях, Н/м²; A – площадь компонентов антенны, м².

Ветровое давление зависит от скорости ветра и высоты установки антенны над землей. Понятно, что расчет нужно выполнять для ветра выше средней силы, скорость которого составляет более 80 км/ч. Если антенная система установлена в пределах 20 м над землей, то при скорости ветра 36 м/с (около 130 км/ч) величина ветрового давления принимается равной 800 Н/м². Если антенная система установлена выше 20 м над землей, то при скорости ветра 42 м/с (около 150 км/ч) величина ветрового давления будет составлять 1100 Н/м². Коэффициент нагрузки принимают равным 1,2 (нагрузка, возникающая из-за снега или льда, здесь не учитывается и при необходимости ее нужно считать отдельно). В зависимости от местных погодных условий величины ветровой нагрузки могут быть и более высокими, например, при скорости ветра 45 м/с (160 км/ч) ветровое давление должно быть не менее 1250 Н/м², а при скорости ветра 56 м/с (200 км/ч) не менее 1900 Н/м². Значения ветрового давления приводятся в таблицах климатических условий.

Теперь изгибающий момент в точке фиксации мачты (точке наибольшей нагрузки) можно рассчитать следующим образом:

$$M = W \cdot l,$$

где M – изгибающий момент, Н·м, W – ветровая нагрузка, Н; l – расстояние от места крепления антенны до точки фиксации мачты, м.

Если на мачте установлен целый антенный комплекс, то ее полный изгибающий момент будет равен сумме таких произведений для каждой антенны, установленной на своей высоте.

Расчет несущего троса включает расчет фактической силы натяжения в условиях эксплуатации, которая не должна превысить предельной прочности троса на разрыв, и расчет расходуемой длины троса. Предельную прочность троса на разрыв и его удельный вес можно найти в документации производителя. Для расчета силы натяжения троса американская фирма TFC предложила методику, учитывающую влияние различных факторов, включая погодные условия. При расчете натяжения троса нужно учесть все составляющие нагрузки, которые могут влиять на его растяжение в реальных условиях, т.е. подсчитать его полную весовую нагрузку. В худшем случае трос растягивается под действием собственного веса, веса кабеля и крепежной конструкции, веса намерзающего льда в зимний период. Кроме этого, нагрузка на трос увеличивается под действием силы ветра. Расходуемая длина троса должна рассчитываться с учетом провиса, который меняется в зависимости от колебаний температуры. При расчете предполагается, что по всей опорной линии кабель протянут на одной высоте от земли.

Натяжение троса H удобнее определять не в единицах измерения силы или веса (Ньютонах, Н), а в единицах измерения массы (килограммах, кг). Поскольку удельная масса (килограммах на метр, кг/м) кабеля известна из документации производителя, то в этом случае сразу будет понятно, отрезок кабеля какой длины сможет выдержать трос. Трос растягивается вдоль своей оси, поэтому нас интересует горизонтальная составляющая натяжения, направленная по касательной к тросу, которую можно вычислить по следующей формуле:

$$H = \frac{WL^2}{8r},$$

где W – полная удельная нагрузка на трос, кг/м; L – расстояние между опорами, м; r – провис троса, м.

Полная удельная нагрузка, действующая на трос, складывается из вертикальной W_V и горизонтальной W_H составляющей, кг/м:

$$W = \sqrt{W_V^2 + W_H^2}.$$

Вертикальная составляющая нагрузки в реальных условиях складывается из веса троса, кабеля и намерзающего льда. В горизонтальном направлении на трос действует сила ветра. Следовательно, суммарная удельная нагрузка определяется по формуле:

$$W = \sqrt{(W_l + W_c + W_t)^2 + F^2},$$

где W_l – удельная масса намерзающего льда, кг/м; W_c – удельная масса кабеля, кг/м; W_t – удельная масса троса с креплением, кг/м; F – удельная нагрузка, создаваемая ветром, кг/м.

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

Удельные массы кабеля и троса приводятся в технической документации этих изделий. Удельную массу намерзающего льда определяют опытным путем или рассчитывают по какой-либо эмпирической формуле, в которой учитывается диаметр связки кабеля с тросом, температура воздуха и толщина льда. Приблизительное значение ветровой нагрузки в зависимости от скорости ветра и толщина льда, как и в приведенном выше расчете изгибающего момента мачты, берется из таблиц климатических условий для конкретной географической области.

Подставив полученное значение W в формулу расчета H , получим натяжение троса в наихудших условиях эксплуатации. Как показывает практика, надежность прокладки кабеля на подвесе можно гарантировать при использовании троса, натяжение которого не превышает 60% от его предельной прочности на разрыв. Если же натяжение троса оказывается больше, следует выбрать более прочный трос и повторить расчет.

Теперь найдем необходимую длину троса. Фактическая длина подвешенного троса с провисом составляет:

$$L_c = L + \frac{8r^2}{3L},$$

где L – расстояние между опорами, м; r – провис троса, м.

Чтобы определить количество троса, которое потребуется для протяжки, нужно найти начальную длину L_0 подвешенного отрезка, которую он имеет в ненапряженном состоянии, т.е. до провисания. Для этого можно применить закон Гука для упругого тела, согласно которому упругая деформация пропорциональна силе, вызывающей эту деформацию. Отсюда получаем исходную длину подвешенного отрезка кабеля:

$$L_0 = \frac{L_c}{1 + H/SE},$$

где H – натяжение троса, кг; S – площадь поперечного сечения троса, м²; E – модуль упругости материала (для стального троса $E = 2,8 \cdot 10^7$ фунт/дюйм² или $E = 1,96 \cdot 10^{10}$ кг/м²). Длина L_0 рассчитывается для некоторой известной температуры T_0 , которая приводится в документации вместе с соответствующими значениями E и S .

Учет влияния температуры представляет процессы натяжения и растяжения троса в динамике. Кабель подвешивается при некоторой начальной температуре. Через некоторое время температура меняется, и с ней меняется длина троса. Если температура падает, трос сжимается и становится короче, в результате чего провис уменьшается, а натяжение увеличивается. В свою очередь, увеличение натяжения, приводит к растяжению троса пропорционально его упругости. При росте температуры происходят обратные процессы. Процессы растяжения и сжатия происходят одновременно и уравнивают друг друга, поддерживая постоянный динамический баланс. Длину отрезка троса при температуре T можно определить по следующей формуле:

$$L_{0T} = L_0(1 + k(T - T_0)),$$

где L_0 – длина троса при температуре T_0 ; k – температурный коэффициент; T – текущая температура в момент прокладки кабеля; T_0 – известная из докумен-

22.4. Механическая защита кабельной сети

тации температура. Наибольшие отклонения длины троса от L_0 определяются при крайних температурах для данных климатических условий.

Таблица 22.1

Параметры несущих тросов фирмы TFC

Диаметр, $\text{м} \cdot 10^{-2}$	Удельная масса, кг/м	Площадь сечения, $\text{м}^2 \cdot 10^{-6}$	Прочность на разрыв, $\text{кг} \cdot 10^3$
0,18	0,021	2,65	0,166
0,27	0,046	6,02	0,817
0,48	0,109	13,63	1,811
0,71	0,244	30,68	4,063
0,95	0,406	51,03	6,992
1,27	0,768	96,52	12,213

Приведенные расчетные формулы могут использоваться по-разному. Можно предварительно задавшись расстоянием между опорами и предполагаемой величиной провиса кабеля при его монтаже, рассчитать натяжение и выбрать подходящий тип троса по условию, допускающему натяжение не более 60% от его прочности. Если расстояния между опорами равны, то расчет выполняется сразу для всей линии. Можно исходить из заданного типа троса, для которого, найдя предельно допустимое натяжение, рассчитать расстояние между опорами на линии. Можно также использовать эти формулы для оценки вероятности вытягивания центрального проводника, появления трещин и разрыва кабеля. Характеристики некоторых тросов, выпускаемых фирмой TFC, приведены в табл. 22.1.

Резюме

Прокладка кабеля выполняется по заранее выбранным маршрутам, отмеченным на картах сетевых маршрутов, составляемых на начальном этапе проектирования сети. Применяется подвесная прокладка и прокладка в грунте или в подземных сооружениях и коммуникациях. В первом случае кабель, как правило, поддерживается несущим тросом. Задача проектировщика заключается в том, чтобы определить расстояния между опорами подвесной линии при заданном типе кабеля или, в случае прокладки на опорах существующих кабельных структур, определить расход кабеля с тросом и его натяжение. Во втором случае кабель защищается специальным коробом или кабелепроводом. Иногда кабель кладется прямо в грунт или на специально подготовленную поверхность, без дополнительной защиты. Это можно делать в тех местах, где слабо сказывается неблагоприятное воздействие окружающей среды, т.е. колебания температуры незначительны и влажность минимальна.

При строительстве кабельной сети существенны такие факторы как способ прокладывания и крепления кабеля, качество выполнения разъемов и кабельных соединений, электрическая защита кабеля, механическая и коррозионная защита кабеля.

Заземление предназначено для снятия высоких напряжений и токов со структуры посредством цепи с низким сопротивлением, замкнутой на землю.

Глава 22. Прокладка и защита кабельной сети

Все корпуса приборов и другие проводящие части кабельной структуры следует заземлить. Если в оболочку кабеля входят металлические элементы, то в местах соединений и установки терминального оборудования они должны быть электрически соединены с другими проводящими частями на протяжении всей системы и заземлены. Электрическое соединение необходимо для нейтрализации разности потенциалов, которые могут существовать между двумя устройствами или кабельными контурами, и защиты технического персонала и абонентов от поражения электрическим током. Электрическое соединение и заземление нескольких кабельных систем, проложенных на одних опорах (телефонная сеть, коаксиальная сеть, электросеть) не только рекомендуется, но и необходимо. Несущие тросы кабельных телефонных сетей и сетей кабельного телевидения тоже соединяются друг с другом, а часто еще и с точками заземления линии питания. Дополнительная механическая защита кабеля при подвесной прокладке необходима, так как он может растягиваться под действием собственной массы, массы намерзающего льда и ветровой нагрузки. Эти условия наряду с резкими перепадами температуры становятся причинами ухудшения характеристик кабеля или его механического повреждения. То же самое относится к антенной системе головной станции.

Меры механической и электрической защиты телевизионной кабельной сети изложены в различных действующих стандартах безопасности для кабельных сетей. Во многом эти методы являются общими для любых кабельных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Джакония В. Е., Гоголь А. А. и др.** Телевидение: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1997. – 640 с.
2. **Быков Р. Е. и др.** Телевидение. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 248 с.
3. **Новаковский С. В.** Стандартные системы цветного телевидения. – М.: Связь, 1976. – 267 с.
4. **Шур А. А.** Передающие телевизионные станции. – М.: Радио и связь, 1991. – 88 с.
5. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986.
6. **Ефимов И. Е., Останькович Г. А.** Радиочастотные линии передачи. – М.: Связь, 1977. – 408 с.
7. **Витевский В. Б., Коновалов А. П. и др.** Кабельное телевидение. – М.: Радио и связь, 1994. – 200 с.
8. **Каневский А. Л.** Кабельное телевидение. – М.: Знание, 1991. – 64 с.
9. **Копылов П. М.** Сети телевизионного вещания. – М.: Связь, 1980. – 232 с.
10. **Реушкин Н. А.** Системы коллективного телевизионного приема. – М.: Радио и связь, 1992. – 168 с.
11. **Артюшенко В. М., Бахарев В. А. и др.** Индивидуальный и коллективный прием спутникового телевидения. – М.: Легпромбытиздат, 1995. – 344 с.
12. **Бушминский И. П., Тюхтин М. Ф.** Приемные системы спутникового телевидения. – М.: Радио и связь, 1993. – 216 с.
13. **Левченко В. Н.** Спутниковое телевидение. – СПб.: ВНУ, 1999. – 288 с.
14. **Пономаренко А. Б.** Спутниковое телевидение. – М.: МГОУ, 1992. – 177 с.
15. **Птачек М.** Цифровое телевидение. Теория и техника. – М.: Радио и связь, 1990. – 528 с.
16. **Новаковский С. В., Котельников А. В.** Новые системы телевидения. Цифровые методы обработки сигналов. – М.: Радио и связь, 1992. – 88 с.
17. **Дворкович А. В., Зубарев Ю. Б. и др.** Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. – М.: НАТ, 1997. – 256 с.
18. **Стен Шатт.** Мир компьютерных сетей. Пер. с англ. – К.: ВНУ, 1996. – 288 с.
19. **Олифер В. Г., Олифер Н. А.** Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с.
20. **Назаров А. Н., Симонов М. В.** АТМ: технология высокоскоростных сетей. – М.: Эко-трендз, 1998. – 234 с.
21. **Гальперович Д. Я.** Радиочастотные кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 186 с.
22. **Гроднев И. И.** Оптические кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
23. **Убайдуллаев Р. Р.** Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2000.
24. **Семенов А. Б.** Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: Компьютер-пресс, 1998. – 263 с.
25. **Кривошеев М. И.** Основы телевизионных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 608 с.
26. **Антипин М. В.** Интегральная оценка качества телевизионных изображений. – М.: Наука, 1970. – 154 с.

Список литературы

27. **Бородич С. В.** Электромагнитная совместимость наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
28. **Сборник** нормативных документов по крупным системам коллективного приема телевидения. – М.: Прейскурантиздат, 1989. – 332.
29. **Положение** Минсвязи России. Основные положения концепции развития информационно-телекоммуникационной инфраструктуры кабельных сетей телевидения и систем MMDS, LMDS и MVDS в России. – 1999.
30. **Положение** ГКРЧ России № 40/5 от 14.10.96. О порядке выделения полос (номиналов) радиочастот для разработки (модернизации) и производства в РФ и ввоза из-за границы на территорию РФ радиоэлектронных средств всех назначений. – 1996.
31. **Инструкция** № 40-у от 09.12.99. О порядке предоставления документов в Лицензионную комиссию Минсвязи России. – 1999.
32. **ГОСТ 21879-88.** Телевидение вещательное. Термины и определения.
33. **ГОСТ 18198-89** (МЭК 107-1-77). Телевизоры. Общие технические условия.
34. **ГОСТ 7845-92.** Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений.
35. **ГОСТ Р52023-2003.** Сети распределительные систем кабельного телевидения.
36. **William Grant.** Cable Television. – GWG Associates Schoharie, NY, 1991.
37. **D. Raskin, D. Stoneback.** Broadband return systems for hybrid fiber-coax cable TV networks. – Prentice Hall PTR, 1998.
38. **CENELEC EN-50083.** – Европейский Комитет по электротехнической стандартизации, Brussels, 1997.
39. **Data-Over-Cable** Service Interface Specifications, Operations Support System Interface Specification, SP-RFI-I05-991105, 1999.
40. **ETSI EN-300 429 V1.2.1.** Digital Video Broadcasting (DVB). Framing structure, channel coding and modulation for cable systems, 1998.

УКАЗАТЕЛЬ АББРЕВИАТУР

- АКТР – Ассоциация кабельного телевидения России 10
- АМ – амплитудная модуляция 69
- АРН – автоматическая регулировка наклона 254
- АРУ – автоматическая регулировка усиления 254
- АТС – автоматическая телефонная станция 541
- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика 103
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь 80, 83
- ВОК – волоконно-оптический кабель 223
- ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи 12, 34, 79, 453
- ВОСП – волоконно-оптическая система передачи 452
- ВЧ – верхние частоты 254
- ГВЗ – групповое время задержки 87
- ГИИ – Глобальная Информационная Инфраструктура 10
- ГКРЧ – Государственный Комитет радиочастот 44
- ГС – головная станция 15
- ДМВ – дециметровые волны 91
- ДРС – домовая распределительная сеть 27
- ИБП – источник бесперебойного питания 565
- ИДП – источник дистанционного питания 565
- КП – коэффициент передачи 103
- КРС – кабельная распределительная сеть 15
- КСВ – коэффициент стоячей волны 145, 204
- КСКПТ – крупная система коллективного приема телепрограмм 8,13
- КТВ – кабельное телевидение 13,17
- ЛВС – локальная вычислительная сеть 536
- МГС – местная головная станция 16
- МВ – метровые волны 91
- МККР – Международный Консультативный Комитет Радио 137
- МПТР – Министерство Печати и Телевидения 44
- МСЭ – Международный Союз Электросвязи 36
- НТВ – наземное телевизионное вещание 297
- НЧ – нижние частоты 254
- ОВЧ – очень высокие частоты 49,91
- ПВО – полное внутреннее отражение 223
- ПЦИ – плезиохронная цифровая иерархия 457

Указатель аббревиатур

- РЭС – радиоэлектронные средства 44
РЧ – радиочастотный (радиочастоты) 48
- СКТ – сеть кабельного телевидения 13
СКПТ – система коллективного приема телепрограмм 8, 13
СВЧ – сверхвысокие частоты 49
СМИ – средства массовой информации 44
СТВ – спутниковое телевизионное вещание 297
СЦИ – синхронная цифровая иерархия 459
- ТфОП – телефонная сеть общего пользования 552
- УГС – узловая головная станция 16
УПЧ – усилитель промежуточной частоты 315
- ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты 522
ФМ – фазовая модуляция 69
- ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь 80
ЦГС – центральная головная станция 16
- ЧМ – частотная модуляция 69
- ЭИИМ – эквивалентная изотропная излучаемая мощность 304
- ADSL – Asymmetric data rate Digital Subscriber Line 541
APD – Avalanche Photo Diode 277
ATM – Asynchronous Transfer Mode 461
- ACTS – Advanced Communication Technologies and Services 10
ACS – Address Control System 515
ANSI – American National Standards Institute 542
- BER – Bit Error Rate 85,284
BSS – Broadcast Satellite Service 304
- CAP – Carrierless Amplitude-Phase 542
CATV – Community Antenna Television Service 13
CCIR – Consultative Committee of International Radio 137
CDM – Code Division Multiplexing 74
CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection 540
CMTS – Cable Modem Termination Server 548
CTB – Composite Triple Beat 153
C/N (CNR) – Carrier-to-Noise Ratio 121
CSO – Composite Second Order 153
CSR – Customer Service Representative 517
CXM – Composite cross Modulation 153
- DBS – Direct Broadcast Service 304
DMT – Discrete Multi Tone 542
DSL – Digital Subscriber Line 541
DVB – Digital Video Broadcasting 76
DOCSIS – Data Over Cable Service Interface Specification 9, 554
DVB/DAVIC – Digital Video Broadcasting и Digital Audio Video Interface Council 9, 554
- EEPROM – Electric Erase Programmed Read Only Memory 527
- FDM – Frequency Division Multiplexing 72

Указатель аббревиатур

- FEC – Forward Error Correction 312
FF – Feed Forward 271
FSS – Fixed Satellite Service 304
- HDSL – High data rate Digital Subscriber Line 541
HFC – Hybrid Fiber Coaxial 19
- IBCoBN – Integrated Broadband Communications on Broadcast Networks 10
IMD – InterModulation Distortion 147
IP – Internet Protocol 20
ISO – International Organization for Standardization 45
ITU – International Telecommunications Union 542
- LAN – Local Area Network 511
LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 285
LED – Light-Emitting Diode 277
LMDS – Local Multipoint Distribution Service 543
LNA – Low Noise Amplifier 306
LNB – Low Noise Block 309
LNC – Low Noise Converter 306
- MAC – Media Access Control 539
MMDS – Multichannel Multipoint Distribution Service 543
MPEG – Motion Pictures Experts Group 83
MTBF – Mean Time Between Failures 171
- NEP – Noise Equivalent Power 295
NF – Noise Figure 265
NIC – Network Interface Card 540
NMS – Network Management System 295
- NRZ – Non-Return to Zero 81
NTSC – National Television Standards Committee 75
- OIRT – Organization International Radio and Television 77
ONU – Optical Network Unit 546
OOB – Out-Of-Band 557
OSI – Open System Interconnection 278
- PAL – Phase Alternation Line 75
PCM – Pulse Code Modulation 81
PD – Power Double 271
PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy 277, 457
PIN – Positive-Intrinsic-Negative 277
PP – Push Pull 271
PRBS – Pseudo Random Binary Sequence 278
PVC – Polyvinytchloride (rigid PVC sheet) 186
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation 70, 84
QD – Quattro Double 271
QoS – Quality of Service
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying 539
- RACE – Research on Advanced Communication in Europe 139
RL – Return Loss 144, 203
ROM – Read Only Memory 527
- SECAM – Sequentiel Couleurs a Memoire 75
SDH – Synchronous Digital Hierarchy 459
SDSL – Single line Digital Subscriber Line 541

Указатель аббревиатур

SMX – Synchronous multiplexer 461	TDM – Time Division Multiplexing 73
SNMP – Simple Network Management Protocol 539	UHF – Ultra High Frequency 49
S/N (SNR) – Signal-to-Noise Ratio 121	UPS – Uninterruptible Power Supply 565
SR – Symbol Rate 312	
SRL – Structural Return Loss 199	VDSL – Very High bit rate Digital Subscriber Line 541
SS – Sync Suppression 521	VHF – Very High Frequency 49
SSAVI – Sync Suppression & Active Video Inversion 523	VoIP – Voice over IP 20
STM – Synchronous Transport Module 460	
SWR – Standing Wave Ratio 145	WAN – Wide-Area Network 511
	WDM – Wave Division Multiplexing 73
TCP – Transmission Control Protocol 553	XMD – Cross Modulation Distortion 147

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абонентская
– линия 539
– розетка (абонентская точка) 16, 505
– цифровая линия 544
Абонентское оборудование (абонентский терминал) 505
Абонентский конвертер 511
Авторизованный доступ 520
Адрес 536
– MAC 538
– IP 552
Адресуемый терминал 32, 514
Аналоговое телевидение 66, 75
Антенна коллективного приема телепрограмм
– спутникового вещания 21, 308, 315
– наземного вещания 8, 308
Армирующие элементы 190, 237
Архитектура системы кабельного телевидения 22
Автоматическая регулировка усиления (АРУ) 254, 314, 356
Амплитудная модуляция (АМ) 60, 301, 448, 466
Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) 87, 168, 260
Аналогово-цифровое преобразование 80, 524
Аттенюатор 190, 402, 509

Б

Бел 48
Биллинговая система 13, 515, 549
Бит 80, 531

Битовая скорость 83, 561
Бод 531

В

Вероятность неправильной передачи бита (BER) 87, 134, 284
Верхняя граничная частота спектра сигнала 80
Ветровая нагрузка 598
Выравнивание АЧХ
– на выходе участка 114
– на входе участка 118
– промежуточное 388
Выходная ступень усилительного устройства 270
Внутренняя (внутриквартирная) разводка кабеля 508
Водонепроницаемость кабеля 186
Возвратные потери 143, 171, 198
Волновое сопротивление 196
Волновой мультиплексор 74
Волокно оптическое
– многомодовое 225
– одномодовое 223
– с градиентным профилем 234
– со ступенчатым профилем 237
Вставка питания (инсертер) 564

Г

Гасящий импульс 521
Гетеродин 77, 104, 512
Гибкость кабеля 188
Гибридная кабельная система 11, 262, 475

Предметный указатель

Головная станция 9, 16, 298

– местная 23, 301, 426

– узловая 22, 440

– центральная 22, 445

Грунтовая прокладка 587

Групповое время задержки (ГВЗ) 87, 145

Д

Двунаправленная передача 16

Декодирующая SMART-карта 526

Декодер 299, 514

Декодирование 85, 564

Делитель 29, 170, 213, 377, 394

Детектор оптический 225, 274

Децибел 53

Децибел-микровольт 58

Децибел-милливольт 56

Децибел-милливатт 61

Дефекты

– оптического волокна 229

– коаксиального кабеля 198

Деформация кабеля 596

Диаметр поля мод 224

Диапазон регулировки

– усиления 267, 359

– наклона 267

Диод

– лавинный 293

– лазерный 287

– светоизлучающий 286

– PIN 278

Диплексер (диплексерный фильтр) 253

Дискретизация 80

Дисперсия света 218

Дисперсия в волокне

– волноводная 227

– материальная 226

– модовая 226

Дистанционное питание 564

Дифракция света 218

Дифференциальная фаза 145, 269

Дифференциальное усиление 145, 268

Диффузия света 215

Диэлектрик 185

Диэлектрическая постоянная 196

Длина

– троса и отрезка кабеля 590

– волны 49

– кодовой комбинации 83

Доступ к цифровым сетям 540

Домовая сеть 16, 376, 411

Домовый ввод 16

Е

Единицы измерения 48

– абсолютные 52

– относительные 56

З

Задержка передачи 88, 538

Заземление 591

Закрытая среда распространения волн 15, 216

Затухание

– света в волокне 217

– сигнала радиочастотного в коаксиальном кабеле 33, 125, 194

– несогласованности 145

Защита

– абонентских розеток 592

– антенного оборудования 593

– от несанкционированного доступа 503

– коаксиального кабеля 188, 588

– оборудования головной станции 326

Предметный указатель

- оптического волокна 245
- Защита кабельной сети
 - механическая 594
 - электрическая 589
- Зрительное восприятие шума 139
- И**
- Изгиб кабеля 188, 584
- Излучение лазера 225
- Измерение уровней сигнала 31, 54
- Изображение телевизионное 69
- Импеданс 197
- Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) 81
- Индивидуальная среда передачи 537
- Интерактивность 9, 19, 102, 493, 538
- Интермодуляции показатель
 - второго порядка (CSO) 140
 - третьего порядка (CTB) 140
- Интермодуляция 132, 136, 319
 - усилителя 145
 - каскада усилителей 151, 325
- Интерференция межсимвольная 217
- Искажения 131
 - линейные 133
 - нелинейные 136
 - светового сигнала в оптическом волокне 213
 - цифрового сигнала при сжатии 81
- Источники
 - питания 548
 - сигнала головной станции 11, 287
- К**
- Кабель
 - коаксиальный 173
 - оптический 223
 - с несущим тросом 176, 564
- Кабелепровод 568
- Кабельная распределительная сеть (КРС) 9, 397
- Кабельный модем 10, 520
 - абонентский 525
 - головной 528
 - коллективный 539
- Канал телевизионный
 - аналоговый 12
 - приема 11
 - распределения 11
 - зеркальный 91
 - промежуточной частоты 89
 - соседний 85, 91
 - цифровой 74
- Канальная
 - емкость 14, 312
 - нагрузка 142, 465
- Каскад усилительных устройств 28, 134, 237
- Категории
 - головных станций 33
 - элементов линейной сети 201
- Качество
 - изображения 127
 - передачи 79, 316
 - обслуживания (качество сервиса, QoS) 35, 518
- Квадратурная модуляция (QPSK, QAM) 77, 513
- Квантование 74
- Класс системы КТВ 7
- Ключ декодирования 497, 505
- Коаксиальный кабель 173
- Кодирование
 - канала от несанкционированного доступа 494
 - помехозащитное 63, 513
- Комбинационные частоты 137

Предметный указатель

Комбинирование отношений 150

Компенсация отклонения уровней 254, 348

Компьютерная сеть 13, 510

Конвертер

– абонентский (декодер) 491

– канальный головной станции 292

Конвертирование частот каналов 89

Конус ввода (угол сходимости) волокна 204, 210

Концентратор 516

Корректор АЧХ 100, 159

Коррекция АЧХ

– на выходе участка 100

– на входе участка 103

Кoeffициент

– возвратных потерь 191

– направленного действия (КНД) антенны 294

– отражения в кабельной сети 192

– передачи 94

– (показатель) преломления 204

– стоячей волны (КСВ) 134, 192

– усиления 250

– шума 114

– экранирования 187

Кроссмодуляции показатель (СХМ) 140

Кроссмодуляция (кроссмодуляционные искажения) 135

Л

Лавинный диод 278

Лазер 213, 273

Легирование 206

Линейный тракт 9, 30

Ловушка (режекторный фильтр) 493

Логарифмический масштаб 47

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) 490, 515

М

Макроизгиб 234

Маршрутизатор 516

Микроизгиб 234

Магистраль (магистральная сеть) 10, 342, 398, 434

Местная (локальная) головная станция 10, 286

Местное питание 543

Многократный эфирный прием 288

Модель трехуровневая системы КТВ 15

Моды световода 209

Модуляция 62

Мониторинг сети 25

Мостовой усилитель 241

Мощность

– оптического передатчика 266, 466

– электромагнитного излучения 45, 90

Муар (помеха) 157

Мультимедиа службы 40, 509

Мультиплексирование

– временное 65

– частотное 65

– волновое 66

– кодовое 67

Мультисвитчер 166

Н

Нагрузка участка усилительного 362, 401

Наклон спектра передачи 98, 155, 344

Наземное телевизионное вещание (НТВ) 284

Направление передачи 11, 458

Направленный ответвитель 162

Напряжение источника питания 544, 551

Натяжение троса 578

Предметный указатель

- Неравномерность АЧХ 80, 95, 201, 303
Нерегулярность 163, 188
Нормативные значения показателей системы 28, 31
- О**
- Оболочка
– изолирующая поливинилхлоридная (PVC) 174
– оптического волокна 206
- Обратное направление передачи (обратный канал) 12, 78, 92, 458, 476
- Оборудование кабельной сети 22
– активное 260
– пассивное 158
- Однонаправленная передача 10
- Оконечные точки кабельной системы 15
- Окно
– регулировки АРУ 347
– прозрачности волокна 208
- Оплетка коаксиального кабеля 180
- Оптимальное усиление усилителя 330
- Оптическая (волоконная) линия связи 4, 29, 433, 457
- Оптический
– передатчик 271
– приемник 276
– узел 10, 457
- Оптический кабель 203
– ленточный 224
– с несущим элементом 225
– с профильным сердечником 226
- Ответвитель
– активный 165
– пассивный 162, 362
– оптический 170
- Ответвление (отвод)
– абонентское 10, 17, 363
– магистральное 10, 398
- Отклонение уровня сигнала 254, 317, 342
- Отношение (единица измерения) 41, 46
- Отражение
– радиосигнала в коаксиальной системе 173, 188
– света в волокне 204
- Оценка субъективная качества изображения 127
- П**
- Пилотное регулирование 11
- Питание кабельной сети 543
- Платные каналы
– с ежемесячной абонентской платой 5, 36, 492
– с оплатой за каждый просмотр (Pay-Per-View) 496
- Повреждение кабеля 177
- Поглощение света 205
- Показатели
– технические системы передачи 80
– системы на выходе абонентской розетки 30
- Полное внутреннее отражение (ПВО) 210
- Полоса частот
– радиоканала ТВ вещания 70
– системы передачи 4, 85
- Полукадр 501
- Полярная подвеска 295
- Помеха
– одночастотная 139
– составная 140
– внешняя 81, 187
- Помехозащитное кодирование 513
- Помехозащищенность цифрового сигнала 74
- Пораженные каналы ТВ вещания 90

Предметный указатель

- Потери передачи радиосигнала 27, 158, 182
- Преломление (рефракция) света в волокне 204
- Преобразование частот 89, 299
- Приведенный динамический диапазон 253
- Проводник 174
- Проектирование кабельной сети 25, 362, 397, 428
- Прокладка кабеля
- подвесная 563
 - траншейная 566
- Пропускная способность канала 512
- Протоколы
- ATM, 536
 - Ethernet, 527
 - IP, 529
 - MAC, 518
 - SNMP, 519
- Прямое направление передачи (прямой канал) 12, 78, 84
- Р**
- Радиорелейная линия передачи 446
- Развязка (изоляция)
- взаимная между выходами прибора 159, 162
 - между прямым и обратным каналами 254
 - по цели питания 550
- Разделение каналов 64
- Разделяемая среда передачи 517
- Разъем (коннектор)
- коаксиальный 23, 575
 - оптоволоконный 228
- Распределитель (делитель) 23, 158, 201, 364, 382
- Распределительная сеть 9, 397
- домовая 10, 363
 - магистральная 10, 342, 398, 434
 - транспортная 9, 428
- Распределительная структура транк-фидер 242, 398
- Рассеяние света 205
- Резервирование
- нагрузки на участке 387
 - оптических узлов 431
- Ресивер спутниковый 298
- С**
- Свет 60, 203
- Сегмент
- распределительный 281, 457
 - вычислительной сети 516
- Секция
- дистанционного питания 547
 - оптической системы передачи 442
- Сердцевина оптического волокна 204, 206
- Сеть
- гибридная 11, 13, 434, 456
 - двунаправленная 12, 458, 473
 - кабельного телевидения 9
 - компьютерная 510, 537
 - передачи данных 510, 515
 - распределительная 9, 397
 - с интеграцией услуг 14, 437, 458
 - телефонная 532
 - широкополосная 4, 12
 - Ethernet 519
- Сжатие цифрового сигнала 76
- Символьная скорость 511
- Синхроимпульс 501
- Система адресного контроля (ACS) 494
- Система кабельного телевидения (система КТВ, СКТ) 9
- Скин-эффект 182

- Скремблирование 494, 499
- с подавлением строчных синхроимпульсов (SS) 501
 - с инвертированием активной части строки (SSAVI) 502
 - с перемешиванием строк (Line Shuffle) 505
 - со смещением активной части строки (Line Shear) 505
 - с перестановкой внутри строки (Line Cut & Rotate) 505
- Службы электросвязи 82
- “Снег” (помеха) 80, 126
- Собственная шумовая мощность усилителя 253
- Согласование коаксиальной кабельной линии 163, 200
- Соединение оптических волокон 227
- Сращивание оптических волокон (сплайс) 229
- Среднее время наработки на отказ 160
- Спектр
- аналогового ТВ сигнала 69
 - группового аналогового ТВ сигнала 71
 - группового цифрового ТВ сигнала 78
 - излучения лазера 213
 - кабельной системы передачи 84
 - электромагнитных волн 44
- Спутник телевизионного вещания 288
- Сплиттер (делитель) 161
- Стандарты сетей кабельного телевидения 3, 30
- ГОСТ Р52023-2003, CENELEC EN 50083
- Стандарты телевизионного вещания аналоговые 68
- PAL, SECAM, NTSC
- Стандарты телевизионного вещания цифровые 69, 78
- DVB-T, DVB-S, DVB-C
- Стандарт сжатия цифрового видеосигнала 76, 444, 515, 535
- MPEG
- Стандарты телефонных модемов 520, 532
- V.32, V.34, V.90
- Стоимость строительства кабельной структуры 37, 411, 423
- Сумматор 159
- Т**
- Телевизионный сигнал 61, 68
- Температурные колебания 176
- Терминатор (заглушка) 167
- Тестирование волоконных соединений 231
- Техническое обслуживание сети 25
- Топология сети 21, 517
- Транзакция 495
- Транспондер 291
- Транспортная сеть 9, 428
- Транк 238, 398
- Трос несущий 564
- Тэп (ответвитель) 162
- У**
- Уплотнение каналов 64
- Уровень выходного сигнала усилителя 248, 325
- Уровень сигнала относительный
- по мощности 51
 - по напряжению 52
- Уровень сигнала на выходе абонентской розетки 336
- минимальный 337
 - максимальный 338
- Уровни квантования 74
- Усиление усилительного устройства 27, 97, 250

Предметный указатель

- Усилитель
- антенный предварительный малошумящий 238, 293
 - домовой (фидерный) 239
 - магистральный (транковый) 238
 - мостовой 241
- Узел оптический 10, 457
- Узловая головная станция 10, 428, 463
- Участок кабельный
- коаксиальной сети 27, 366, 398
 - оптической сети (секция) 29, 442
- Участок "последней мили" 17
- Уширение импульса 214
- Ф**
- Фильтр
- двунаправленный 473
 - полосовой 300
- Фидер 238, 398
- Фазовая модуляция (ФМ) 62
- Формирование ТВ сигнала 60
- Фотодетектор 277
- Фотоэлектрический эффект 205
- Ц**
- Центральная головная станция 10, 285, 428
- Цифро-аналоговое преобразование 77, 504
- Цифровая абонентская линия (DSL) 525
- Цифровая иерархия
- плезиохронная 263, 438
 - синхронная 264, 440
- Цифровое телевидение 71
- Ч**
- Частота 42
- развертки ТВ изображения 69
 - промежуточная 71
- Частоты
- несущих радиосигналов изображения и звука 70, 84
 - передачи в кабельной сети 92
 - телевизионного вещания 85
- Частотный план 89
- Частотная модуляция (ЧМ) 62
- Числовая апертура 211
- Ш**
- Шкала экспертных оценок 83, 126
- Шум 109
- каскада усилителей 119
 - усилителя 114
- Шум квантования 74
- Шума показатель
- несущая-шум (C/N) 111, 253
 - сигнал-шум (S/N) 111, 126
- Шумовая мощность и напряжение 110
- Шумовая температура 110, 294
- Шумовой порог устройства 113
- Э**
- Эквалайзер (корректор АЧХ) 100, 159
- Эквипотенциальное соединение 571
- Экранирование коаксиального кабеля 179, 188
- Электромагнитная волна 41
- Элементы (компоненты) кабельной сети 22, 96
- Энергопотребление кабельной сети 546
- Эфирное телевизионное вещание 1
- Эффективность ответвлений 370