

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. Основные сведения о ВОЛС	7
1.1. Общие положения.....	7
1.2. Основные компоненты ВОЛС.....	9
Литература к предисловию и главе 1.....	10
2. Оптическое волокно	11
2.1. Типы оптических волокон.....	11
2.2. Распространение света по волокну.....	13
2.3. Характеристики поставляемых волокон.....	28
Литература к главе 2.....	35
3. Пассивные оптические компоненты	36
3.1. Разъемные соединители.....	36
3.2. Сварное соединение волокон.....	46
3.3. Оптические разветвители.....	49
3.4. Устройства волнового уплотнения WDM.....	53
3.5. Оптические изоляторы.....	57
3.6. Другие специальные пассивные компоненты ВОЛС.....	59
3.7. Оптические распределительные и коммутационные устройства.....	61
Литература к главе 3.....	72
4. Электронные компоненты систем оптической связи	73
4.1. Передающие оптоэлектронные модули.....	73
4.2. Приемные оптоэлектронные модули.....	78
4.3. Повторители и оптические усилители.....	86
4.4. Разновидности усилителей EDFA.....	92
Литература к главе 4.....	94
5. Сети передачи данных	96
5.1. Мультиплексирование.....	96
5.2. Сети с коммутацией каналов и пакетов.....	104
5.3. Эталонная модель OSI.....	113
Литература к главе 5.....	115
6. Сети FDDI	116
6.1. Принцип действия.....	117
6.2. Составляющие стандарта FDDI.....	118
6.3. Типы устройств и портов.....	120
6.4. Оптический обходной переключатель.....	125
6.5. Кабельная система и уровень PMD.....	129
6.6. Уровень PHY.....	133
6.7. Уровень MAC.....	140
6.8. Обзор уровня SMT.....	145
6.9. Построение сетей FDDI.....	147
Литература к главе 6.....	151
7. Сети Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet	153
7.1. Сети Ethernet.....	154
7.2. Основные типы устройств Ethernet.....	163
7.3. Проектирование сети в пределах коллизийного домена Ethernet.....	171
7.4. Сети Fast Ethernet.....	175
7.5. Проектирование сети в пределах коллизийного домена Fast Ethernet.....	179
7.6. Дуплексный Ethernet.....	182
7.7. Сети Gigabit Ethernet (стандарты IEEE 802.3z и 802.3ab).....	183
7.8. Миграция Ethernet к магистральным сетям.....	191
Литература к главе 7.....	197

8. Полностью оптические сети	199
8.1. Основные определения и элементы.....	199
8.2. Плотное волновое мультиплексирование.....	200
8.3. Применение оптических усилителей EDFA.....	205
8.4. Оптимизация \ЛЮМДОМ.....	212
8.5. Оптические коммутаторы.....	214
8.6. Волновые конвертеры.....	221
8.7. Классификация полностью оптических сетей.....	222
8.8. AON с коммутацией каналов.....	225
8.9. AON с коммутацией пакетов.....	231
8.10. Архитектура AON.....	233
8.11. Прототипы и коммерческие реализации AON.....	235
Литература к главе 8.....	237
9. Сети абонентского доступа	239
9.1. Концепции развития абонентских сетей.....	239
9.2. Сети HFC.....	244
9.3. Платформа доступа Homeport.....	247
9.4. Межстудийный телевизионный обмен и система DV6000.....	254
Литература к главе 9.....	256
Указатель терминов и определений	258
Список сокращений	262

1. Основные сведения о ВОЛС

1.1. Общие положения

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". Волоконно-оптическая сеть – это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне.

Преимущества ВОЛС

Широкая полоса пропускания – обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10^{14} Гц [3]. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания – это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации.

Малое затухание светового сигнала в волокне. Выпускаемое в настоящее время отечественными и зарубежными производителями промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,2-0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчете на один километр. Малое затухание и небольшая дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 км и более [4].

Низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания, путем передачи различной модуляции сигналов с малой избыточностью кода.

Высокая помехозащищенность. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т.д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям.

Малый вес и объем. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность. Например, 900-парный телефонный кабель диаметром 7,5 см, может быть заменен одним волокном с диаметром 0,1 см. Если волокно "одеть" в множество защитных оболочек и покрыть стальной ленточной броней, диаметр такого ВОК будет 1,5 см, что в несколько раз меньше рассматриваемого телефонного кабеля [5, 6]

Высокая защищенность от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить "взламываемый" канал связи и подать сигнал тревоги. Сенсорные системы, использующие интерференционные эффекты распространяемых световых сигналов (как по разным волокнам, так и разной поляризации) имеют очень высокую чувствительность к колебаниям, к небольшим перепадам давления [7]. Такие системы особенно необходимы при создании линий связи в правительственных, банковских и некоторых других специальных службах, предъявляющих повышенные требования к защите данных. Рассмотрение волоконно-оптических сенсорных систем выходит за рамки материала данной книги.

Гальваническая развязка элементов сети. Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать электрических "земельных" петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках зда-

ния, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, что способно повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет.

Взрыво- и пожаробезопасность. Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

Экономичность ВОК. Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. В настоящее время стоимость волокна по отношению к медной паре соотносится как 2:5. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции. Количество повторителей на протяженных линиях сокращается при использовании ВОК. При использовании солитонных систем передачи достигнуты дальности в 4000 км без регенерации (то есть только с использованием оптических усилителей на промежуточных узлах) при скорости передачи выше 10 Гбит/с [8].

Длительный срок эксплуатации. Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений/стандартов приемо-передающих систем.

Удаленное электропитание. В некоторых случаях требуется удаленное электропитание узла информационной сети. Оптическое волокно не способно выполнять функции силового кабеля. Однако, в этих случаях можно использовать смешанный кабель, когда наряду с оптическими волокнами кабель оснащается медным проводящим элементом. Такой кабель широко используется как в России, так и за рубежом.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации, волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, главным образом из-за дороговизны прецизионного монтажного оборудования и надежности лазерных источников излучения. Многие из недостатков вероятнее всего будут нивелированы с приходом новых конкурентоспособных технологий в волоконно-оптические сети.

Недостатки ВОЛС

Стоимость интерфейсного оборудования. Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники остается пока еще довольно высокой. При создании оптической линии связи также требуются высоконадежное специализированное пассивное коммутационное оборудование, оптические соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение-отключение, оптические разветвители, аттенюаторы.

Монтаж и обслуживание оптических линий. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи также остается высокой. Если же повреждается ВОК, то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды.

Производители тем временем поставляют на рынок все более совершенные инструменты для монтажных работ с ВОК, снижая цену на них.

Требование специальной защиты волокна. Прочно ли оптическое волокно? Теоретически да. Стекло, как материал, выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1ГПа (10^9 Н/м²) [9]. Это, казалось бы, означает, что волокно в единичном количестве с диаметром 125 мкм выдержит вес гири в 1 кг. К сожалению, на практике это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксикарилата, а сам оптический кабель упрочняется, например нитями на основе кевлара (kevlar¹). Если требуется удовлетворить еще более жестким условиям на разрыв, кабель может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

¹ Kevlar – зарегистрированная торговая марка материала корпорации E.I. du Pont de Nemours. Kevlar – неметаллический материал, выдерживающий большие нагрузки на растяжение.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, дальнейшие перспективы развития технологии ВОЛС в информационных сетях более чем очевидны.

Типовая схема системы волоконно-оптической связи

Типовая схема системы связи, использующей ВОЛС, показана на рис. 1.1. Аналоговый сигнал, генерируемый оконечным оборудованием данных (ООД), например, телефоном, терминалом, видеокамерой и т.д., приходит на узел коммутации, где аналого-цифровой преобразователь (кодер) оцифровывает его в битовый поток. Битовый поток используется для модуляции оптического передатчика, который передает серию оптических импульсов в оптическое волокно. На приемной стороне импульсы света преобразуются обратно в электрический сигнал при помощи оптического приемника. Декодерная часть коммуникационной системы преобразует бинарный электрический поток обратно в аналоговый сигнал ООД. Обычно кодеры и декодеры, а так же оптические приемники и передатчики совмещаются в одном устройстве, так что образуется двунаправленный канал связи.



Рис. 1.1. Типовая схема системы связи с использованием ВОЛС "точка-точка"

1.2. Основные компоненты ВОЛС

Оптический передатчик обеспечивает преобразование входного электрического (цифрового или аналогового) сигнала в выходной световой (цифровой или аналоговый) сигнал. При цифровой передаче оптический излучатель передатчика "включается" и "выключается" в соответствии с поступающим на него битовым потоком электрического сигнала. Для этих целей используются инфракрасные светоизлучающие диоды LED или лазерные диоды ILD. Эти устройства способны поддерживать модуляцию излучаемого света с мегагерцовыми и даже гигагерцовыми частотами. При построении сетей кабельного телевидения оптический передатчик осуществляет преобразование широкополосного аналогового электрического сигнала в аналоговый оптический. В последнем случае оптический передатчик должен иметь высокую линейность.

Оптический приемник осуществляет обратное преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока. В качестве основного элемента оптического приемника используются *p-i-n* и лавинные фотодиоды, имеющие очень малую инерционность.

Если приемная и передающая станции удалены на большое расстояние друг от друга, например на несколько сот километров, то может дополнительно потребоваться одно или несколько промежуточных регенерационных устройств для усиления ослабевающего в процессе распространения оптического сигнала, а также для восстановления фронтов импульсов. В качестве таких устройств используются повторители и оптические усилители.

Повторитель состоит из оптического приемника, электрического усилителя и оптического передатчика. При передаче дискретного сигнала электрическое усиление, как правило, также может сопровождаться восстановлением фронтов и длительностей передаваемых импульсов. Для этого повторитель принимает оптический сигнала в синхронном или асинхронном режиме, в зависимости от стандарта передачи.

При *синхронном режиме* приемное устройство повторителя регулярно принимает синхрои́мпульсы, на основании которых настраивает свой таймер, задающий частоту для последующей передачи. Существует непрерывный битовый поток в линии. И даже если нет пере-

дачи данных, синхроимпульсы продолжают поступать. В передающую последовательность повторитель добавляет синхроимпульсы, предназначенные для синхронизации следующего каскада.

При *асинхронном режиме* передаваемая информация организуется в специальные пакеты данных – кадры. Каждому пакету предшествует последовательность однотипных групп битов – преамбула. Именно преамбула обеспечивает синхронизацию приемного устройства, которое до начала приема находится в ждущем режиме.

Повторитель, который восстанавливает форму оптического сигнала до первоначальной, называется *регенератором*.

Оптический усилитель не осуществляет оптоэлектронного преобразования, как это делает повторитель или регенератор. Он, используя специальные активные среды и лазеры накачки, непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал, благодаря индуцированному излучению. Таким образом, усилитель не наделен функциями восстановления скажженности, в чем уступает повторителю. Однако, есть две основные причины, которые делают применение усилителя более предпочтительным.

1. Следует иметь в виду, что качество сигналов, передаваемых по оптическому волокну, даже если сегмент протяженный, остается очень высоким вследствие малой дисперсии и затухания. Также не велик уровень вносимых шумов из-за подверженности волокна влиянию электромагнитного излучения. Поэтому ретрансляция передаваемых данных простым усилением без полной регенерации становится весьма эффективной.

2. Оптический усилитель является более универсальным устройством, поскольку в отличие от регенератора он не привязан к стандарту передающегося сигнала или определенной частоте модуляции.

На практике на один регенератор может приходиться несколько последовательно расположенных оптических усилителей (до 4-8). Таким образом, эффективность использования оптических усилителей при построении волоконно-оптических магистралей большой протяженности очень высока.

Волоконно-оптический кабель (ВОК). Характерная строительная длина оптического кабеля (длина непрерывного участка кабеля, поставляемого на одном барабане) варьируется в зависимости от производителя и типа кабеля в пределах 2-10 км. На протяженных участках между повторителями (репитерами) могут помещаться десятки строительных длин кабелей. В этом случае производится специальное сращивание (как правило, *сварка*) оптических волокон. На каждом таком участке концы ВОК защищаются специальной герметичной проходной муфтой.

2. Оптическое волокно

2.1. Типы оптических волокон

Оптические волокна производятся разными способами, обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber).

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber).

Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна (step index single mode fiber) или стандартные волокна SF (standard fiber), на волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion-shifted single mode fiber), и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber)

Типы и размеры волокон приведены на рис. 2.1. Каждое волокно состоит из сердцевинки и оболочки с разными показателями преломления. Сердцевина, по которой происходит распространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала. При обозначении волокна указываются через дробь значения диаметров сердцевинки и оболочки. Волокна отличаются диаметром сердцевинки и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевинки. У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевинки зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для улучшения технических характеристик или для достижения специальных характеристик волокна.

Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рис. 2.1 а, б), то градиентное волокно имеет лучшие технические характеристики, чем ступенчатое, по дисперсии. Главным образом это связано с тем, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне – основной источник дисперсии – значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом волокне, что приводит к большей пропускной способности у градиентного волокна.

Одномодовое волокно имеет значительно меньший диаметр сердцевинки по сравнению с многомодовым и, как следствие, из-за отсутствия межмодовой дисперсии, более высокую пропускную способность. Однако оно требует использования более дорогих лазерных передатчиков.

В ВОЛС наиболее широко используются следующие стандарты волокон (табл. 2.1):

- многомодовое градиентное волокно 50/125 (рис. 2.1 а);
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рис. 2.1 б);
- одномодовое ступенчатое волокно SF (волокно с несмещенной дисперсией или стандартное волокно) 8-10/125 (рис. 2.1 в);
- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125 (рис. 2.1 г);
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с предыдущим типом волокна).

Таблица 2.1. Стандарты оптических волокон и области их применения

Многомодовое волокно		Одномодовое волокно		
MMF 50/125 градиентное волокно	MMF 62,5/125 градиентное волокно	SF (NDSF) ступенчатое волокно	DSF волокно со смещенной дисперсией	NZDSF волокно с ненулевой смещенной дисперсией
ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM)	ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM)	Протяженные сети (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM), магистрали SDH)	Сверхпротяженные сети, супермагистрали (SDH, ATM)	Сверхпротяженные сети, супермагистрали (SDH, ATM), полностью оптические сети

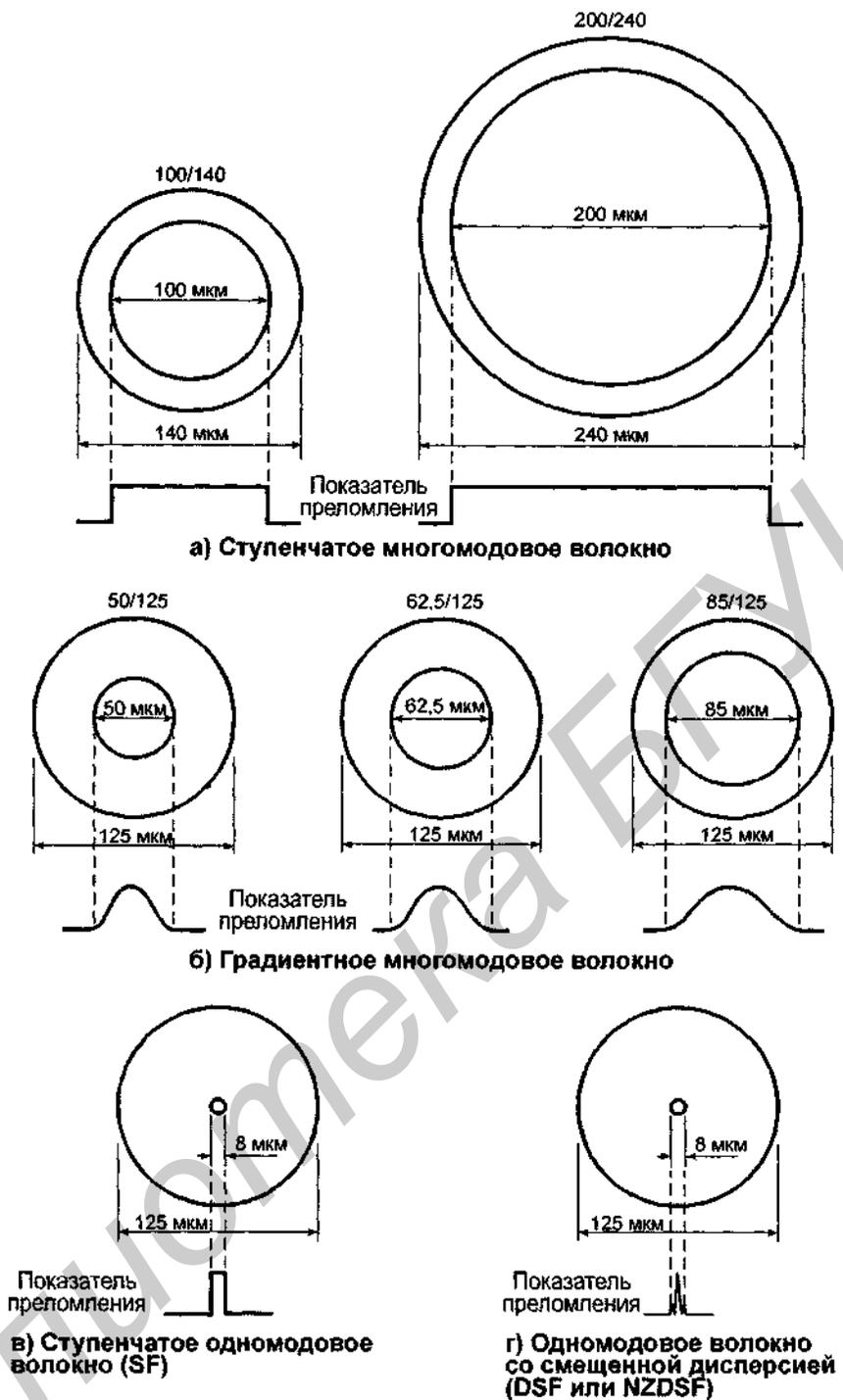


Рис. 2.1. Типы оптических волокон

Большинство устройств волоконной оптики используют область инфракрасного спектра в диапазоне от 800 до 1600 нм в основном в трех окнах прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм, рис. 2.8 [1]. Именно окрестности этих трех длин волн образуют локальные минимумы затухания сигнала и обеспечивают большую дальность передачи.

Многомодовые градиентные волокна

В стандартном многомодовом градиентном волокне (50/125 или 62,5/125) диаметр светонесущей жилы 50 и 62,5 мкм, что на порядок больше длины волны передачи. Это приводит к распространению множества различных типов световых лучей – мод – во всех трех окнах

прозрачности. Два окна прозрачности 850 и 1310 нм обычно используют для передачи света по многомодовому волокну.

Одномодовые волокна

В ступенчатом одномодовом волокне (SF) диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света $\lambda > \lambda_{CF}$ ($\lambda > \lambda_{CF}$ – длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в одномодовом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

В одномодовом волокне со смещенной дисперсией (DSF) длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль, – длина волны нулевой дисперсии λ_0 – смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рис. 2.1 г. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 и более км. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к 1550 нм.

Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн (мультиплексного волнового сигнала) и наиболее эффективно может использоваться при построении магистралей "полностью оптических сетей" – сетей, на узлах которых не происходит оптоэлектронного преобразования при распространении оптического сигнала.

Передача мультиплексного сигнала на большие расстояния требует использования линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили так называемые эрбиевые усилители на основе легированного эрбием волокна (EDFA). Линейные усилители типа EDFA эффективно могут усиливать сигнал в своем рабочем диапазоне от 1530-1560 нм. Длина волны нулевой дисперсии у волокна NZDSF, в отличие от волокна DSF, выведена за пределы этого диапазона, что значительно ослабляет влияние нелинейных эффектов в окрестности точки нулевой дисперсии при распространении нескольких длин волн.

Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых волокон совершенно не означает, что они всегда должны использоваться исключительно под определенные задачи: SF – передача сигнала на длине волны 1310 нм, DSF – передача сигнала на длине волны 1550 нм, NZDSF – передача мультиплексного сигнала в окне 1530-1560 нм. Так, например, мультиплексный сигнал в окне 1530-1560 нм можно передавать и по стандартному ступенчатому одномодовому волокну SF. Однако длина безретрансляционного участка при использовании волокна SF будет меньше, чем при использовании NZDSF, или иначе потребуется очень узкая полоса спектрального излучения лазерных передатчиков для уменьшения результирующей хроматической дисперсии. Максимальное допустимое расстояние определяется техническими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией), так и приемопередающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

2.2. Распространение света по волокну

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в волокне, наряду с длиной волны излучения, являются: геометрические параметры волокна; затухание; дисперсия.

Геометрические параметры волокна

Относительная разность показателей преломления. Волокно состоит из сердцевины и оболочки. Оболочка окружает оптически более плотную сердцевину, являющуюся светонесущей частью волокна, рис. 2.2. Будем обозначать через n_1 и n_2 показатели преломления сердцевины и оболочки, соответственно. Один из важных параметров, который характеризует волокно, это – относительная разность показателей преломления Δ :

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2. \quad (2-1)$$

Если показатель преломления оболочки выбирается всегда постоянной величиной, то показатель преломления сердцевины в общем случае может зависеть от радиуса. В этом случае для проведения различных оценок параметров волокна в место n_1 используют $n_{1\text{eff}}$.

Распространение света по волокну можно объяснить на основе принципа полного внутреннего отражения, вытекающего из закона преломления света Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (2-2)$$

где n_1 – показатель преломления среды 1, θ_1 – угол падения, n_2 – показатель преломления среды 2, θ_2 – угол преломления.

Формальные выкладки удобнее производить для ступенчатого волокна (волокна со ступенчатым профилем показателя преломления), в котором показатель преломления сердцевины является постоянной величиной ($n_1 = \text{const}$). На рис. 2.2 показан ход лучей в таком волокне. Так как сердцевина является оптически более плотной средой по отношению к оболочке ($n_1 > n_2$), то существует критический угол падения θ_c – внутренний угол падения на границу, при котором преломленный луч идет вдоль границы сред ($\theta_2 = 90^\circ$). Из закона Снеллиуса легко найти этот критический угол падения:

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1). \quad (2-3)$$

Если угол падения на границу раздела меньше критического угла падения (луч 2), то при каждом внутреннем отражении часть энергии рассеивается наружу в виде преломленного луча, что приводит в конечном итоге к затуханию света. Если же угол падения больше критического угла (луч 1), то при каждом отражении от границы вся энергия возвращается обратно в сердцевину благодаря полному внутреннему отражению.

Лучи, траектории которых полностью лежат в оптически более плотной среде, называются направляемыми. Поскольку энергия в направляемых лучах не рассеивается наружу, такие лучи могут распространяться на большие расстояния.



Рис. 2.2. Ход лучей в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем

Числовая апертура. Важным параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура NA . Она связана с максимальным углом θ_A вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну, формулой:

$$NA = \sin \theta_A. \quad (2-3)$$

Фирмы-изготовители волокна экспериментально измеряют угол θ_A и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна. Для волокна со ступенчатым профилем легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2-5)$$

Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры $NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}$, значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевин и оболочки. Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления, формула (2-10), определяется эффективная числовая апертура, которая равна

$$NA_{\text{eff}} = \sqrt{n_1^2(0) - n_2^2} / \sqrt{2}, \quad (2-6)$$

где $n_1(0)$ – максимальное значение показателя преломления на оси.

Нормированная частота. Другим важным параметром, характеризующим волокно и распространяющийся по нему свет, является *нормированная частота* V , которая определяется как

$$V = \pi d \cdot NA / \lambda, \quad (2-7)$$

где d – диаметр сердцевин волокна.

Номенклатура мод. При более строгом рассмотрении процесса распространения света по волокну следует решать волновые уравнения Максвелла. Именно в этой трактовке лучи ассоциируются с волнами, причем различные типы волн – решения уравнений – называются *модами*. Сами моды обозначаются буквами E и/или H с двумя индексами p и m (E_{pm} и H_{pm}). Индекс p характеризует азимутальные свойства волны (число изменений поля по окружности), а m – радиальные (число изменений поля по диаметру). По оптическому волокну распространяются только два типа волн: симметричные (E_{0m} и H_{0m}), у которых только одна продольная составляющая, и несимметричные (смешанные) (E_{pm} и H_{pm}), у которых имеется две продольные составляющие. При этом, если преобладает продольная составляющая электрического поля – E_z , то волна обозначается EH_{pm} , а если преобладает продольная составляющая магнитного поля – H_z , то волна называется HE_{pm} . Сопоставляя волновую теорию с геометрической оптикой, следует отметить, что симметричные моды E_{0m} и H_{0m} соответствуют меридиональным лучам, несимметричные моды E_{pm} и H_{pm} – косым лучам [10].

По волокну могут распространяться как только одна мода – одномодовый режим, так и много мод – многомодовый режим. Многомодовый или одномодовый характер идущего по волокну света коренным образом влияет на дисперсию, а следовательно, и на пропускную способность волокна. Расчет на основе уравнений Максвелла позволяет найти простой критерий распространения одной моды: $V < 2,405$ (точное значение константы в правой части неравенства определяется первым нулем функции Бесселя $I_0(x)$, [1, 2]). Это гибридная мода HE_{11} . Отметим, что нормированная частота явно зависит от длины волны света. В табл. 2.2 приведены значения нормированной частоты, вычисленные по формуле (2-7).

Как видно из табл. 2.2, в одномодовом ступенчатом волокне при длине волны света 1550 нм выполняется критерий (2-8), и поэтому распространяется только одна мода. При длине волны 1310 нм критерий не выполнен, что означает возможность распространения нескольких мод в одномодовом волокне на этой длине волны. На практике, однако, волокно помещается в кабель, который, будучи проложенным, имеет множество изгибов. Особенно велики искривления волокна в сплайс-боксах. Искривление волокна приводит к быстрому затуханию неосновных мод. Во всех остальных случаях наблюдается многомодовый характер распространения света. Отметим, что при длине волны 850 нм критерий (2-8) нарушается для

всех типов волокон. Таким образом, если вводить излучение длиной волны 850 нм в одномодовое волокно, то иметь место будет многомодовый режим распространения света. Противоречия здесь нет. Дело в том, что ступенчатое одномодовое волокно 8/125 предназначено для использования в спектральных окрестностях двух длин волн: 1310 нм и 1550 нм, где оно в истинном смысле проявляет себя как одномодовое.

Таблица 2.2. Значения основных оптических параметров волокон и нормированной частоты V для различных длин волн

№№	Оптическое волокно				λ (нм)		
	Название и диаметр	Δ (%)	n_1	NA	1550	1310	850
1	step MMF 200/240	-	-	0,39*	$V=158,09$	187,06	288,29
2	step MMF 100/140	-	-	0,29*	58,77	69,54	107,18
3	grad MMF 62,5/125	2,1**	1,47**	0,28**	35,46	41,96	64,67
4	grad MMF 50/125	1,25**	1,46**	0,20**	20,26	23,98	36,95
5	step SMF (SF) 8,3/125	0,36**	1,468**	0,13**	<u>2,187</u>	<u>2,588</u>	3,990

Обозначения step MMF (multi mode fiber) – ступенчатое многомодовое волокно; step SMF (single mode fiber) – ступенчатое одномодовое волокно; grad MMF – градиентное многомодовое волокно;

* – параметры волокон из [3]; ** – параметры волокон, производимых фирмой Corning [4]

Количество мод. Если при $V < 2,405$ может распространяться только одна мода, то с ростом V количество мод начинает резко расти, причем новые типы мод "включаются" при переходе V через определенные критические значения, табл. 2.3.

Таблица 2.3. Номенклатура мод низких порядков

Нормированная частота V	Число мод N_m	Типы мод
0 – 2,405	1	HE_{11} – основная мода (единственная допустимая для одномодового волокна)
2,405 – 3,832	4	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}$
3,832 – 5,136	7	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}$
5,136 – 5,52	9	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}$
5,52 – 6,38	12	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}$
6,38 – 7,02	14	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}$
7,02 – 7,59	17	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}, HE_{13}, EH_{12}, HE_{31}$
7,59 – 8,42	19	$HE_{11}, H_{01}, E_{01}, HE_{21}, HE_{12}, EH_{11}, HE_{31}, EH_{21}, HE_{41}, H_{02}, E_{02}, HE_{22}, EH_{31}, HE_{51}, HE_{13}, EH_{12}, HE_{31}, EH_{41}, HE_{61}$

При больших значениях V количество мод N_m для ступенчатого волокна можно оценить по формуле:

$$N_m = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} NA \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2). \quad (2-8)$$

Значение этого выражения может быть как целым, так и дробным. В действительности же число мод может быть только целым и составлять величину от одной до нескольких тысяч

Количество мод для градиентного оптического волокна с параболическим профилем сердцевины:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2}, & 0 \leq r < a \\ n_2, & a \leq r < b \end{cases} \quad (2-9)$$

(a – радиус сердцевины, b – радиус оболочки) определяется так:

$$N_m = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2). \quad (2-10)$$

На рис 2.3 показана общая картина распространения света по разным типам световодов многомодовому ступенчатому, многомодовому градиентному, и одномодовому ступенчатому волокну.

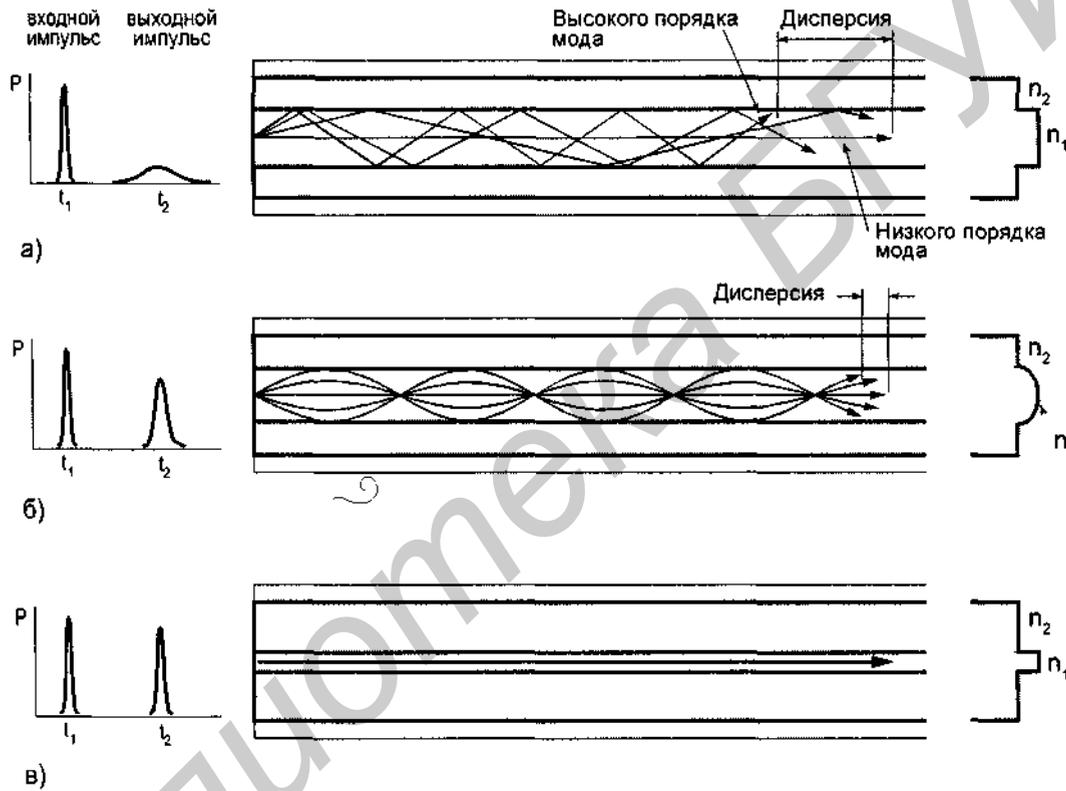


Рис. 2.3. Распространение света по разным типам волокон:

- а) многомодовое ступенчатое волокно,
- б) многомодовое градиентное волокно,
- в) одномодовое ступенчатое волокно

Длина волны отсечки (cutoff wavelength)

Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется *длиной волны отсечки*. Этот параметр характерен для одномодового волокна. Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения света. В этом случае появляется дополнительный источник дисперсии – межмодовая дисперсия, ведущий к уменьшению полосы пропускания волокна.

При измерении кабельной длины волны отсечки λ_{CCF} тестируемый образец волокна должен иметь длину 22 м. Большая часть волокна свертывается и располагается на катушке с радиусом не меньше, чем 140 мм, что моделирует кабельные эффекты. Затем делается по одной петле диаметром 76 мм на расстоянии 1 м от каждого конца волокна для моделирования эффекта изгиба волокна в сплайс-боксах, рис. 2.5 б. И, наконец, в средней части делается две дополнительные петли радиусом, меньшим 140 мм.

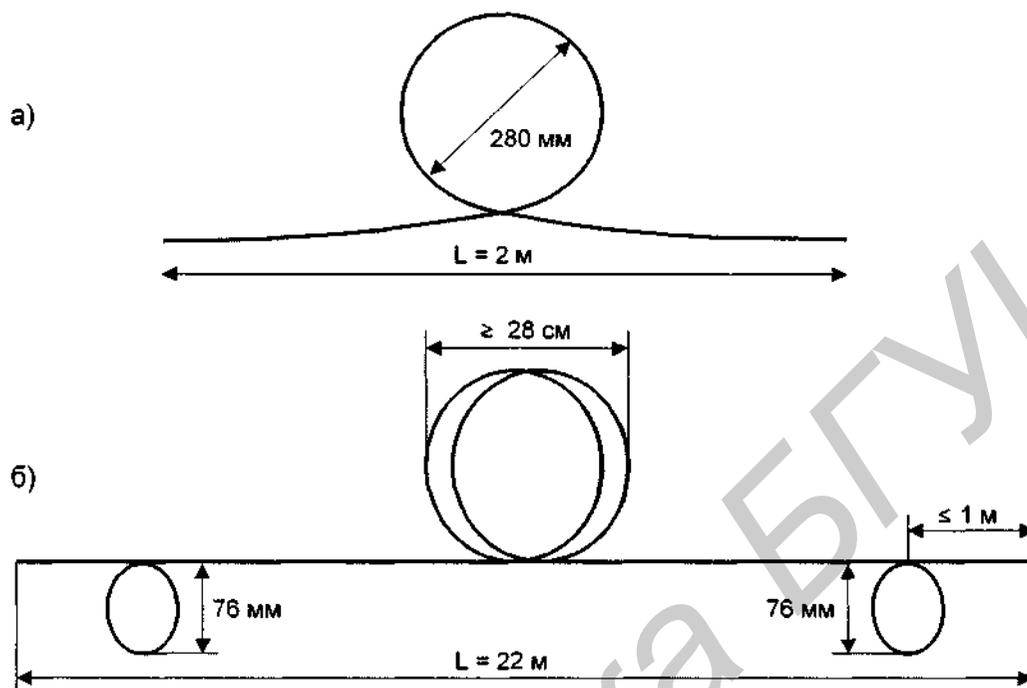


Рис. 2.5. Размещение волокна: а) при определении λ_{CF} ; б) при определении λ_{CCF}

Затухание

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в волокне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как: потери на поглощении; потери на рассеянии; кабельные потери.

Потери на поглощении и на рассеянии вместе называют *собственными потерями*, в то время как кабельные потери в силу их природы называют также *дополнительными потерями*, рис. 2.6.



Рис. 2.6. Основные типы потерь в волокне

Полное затухание в волокне (измеряется в дБ/км) определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{rad}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{sct}} + \alpha_{\text{rad}} \quad (2-12)$$

Потери на поглощении α_{abs} состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь, рис. 2.7. Следует отметить характерный максимум в районе длины волны 1480 нм, который соответствует примесям OH^- . Этот пик присутствует всегда. Область спектра в районе этого пика ввиду больших потерь практически не используется.

Собственные потери на поглощении растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением, рис. 2.7.

Потери на рассеянии α_{sct} . Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. Рэлеевское рассеяние вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна.

Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону λ^{-4} и сильнее проявляются в области коротких длин волн, рис. 2.7.

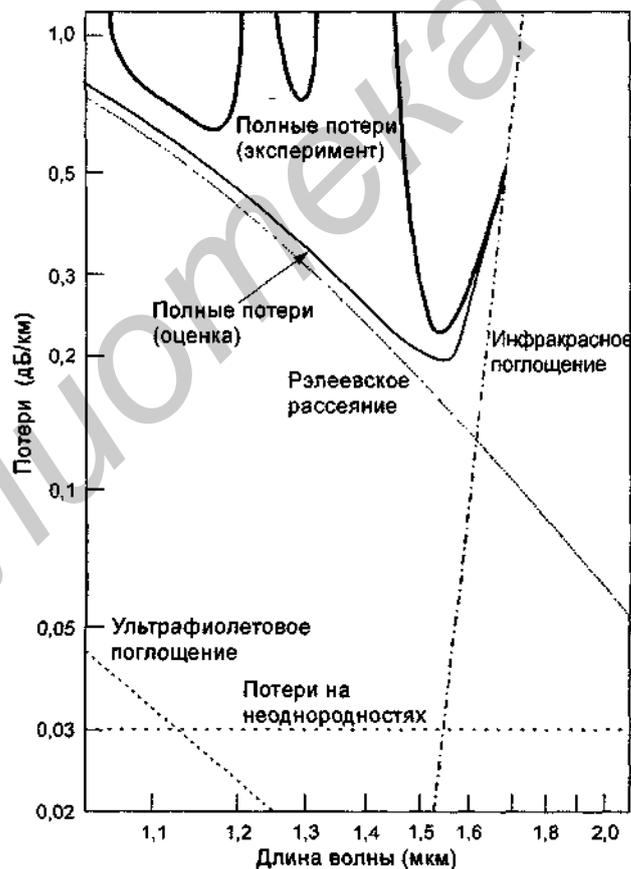


Рис. 2.7. Факторы, влияющие на затухание в области длины волны 1500 нм (по материалам фирмы Corning Optical Fiber, [7])

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

Внутренние потери хорошо интерполируются формулой: $\alpha = K_{rel}\lambda^{-4} + \delta_{OH}(\lambda) + C e^{-k/\lambda}$, где $\delta_{OH}(\lambda)$ отражает пик поглощения на примесях ОН с максимумом при 1480 нм, а первое и последнее слагаемые соответствуют рэлеевскому рассеянию и инфракрасному поглощению соответственно ($K_{rel} = 0,8 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$; $C = 0,9 \text{ дБ/км}$; $k = 0,7-0,9 \text{ мкм}$; данные приведены для кварца). На рис. 2.8 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм, и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для современных одномодовых и многомодовых волокон.

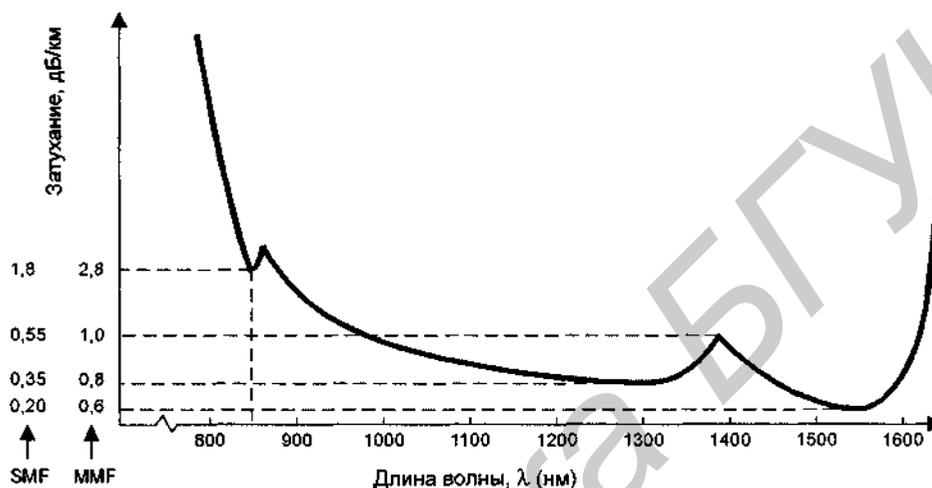


Рис. 2.8. Собственные потери в оптическом волокне

Кабельные (радиационные) потери α_{rad} обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производства кабеля, а так же в процессе инсталляции ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны радиационных потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные радиационные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

Потенциальные ресурсы волокна и волновое уплотнение

Не принимая во внимание дисперсию, то есть искажение сигнала по мере распространения по волокну, рассмотрим сначала потенциальные возможности волокна.

Длина волны и частота светового излучения связаны между собой формулой $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света ($3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$). Дифференцируя по λ , получаем $d\nu/d\lambda = -c/\lambda^2$, а следовательно, окну $\Delta\lambda$ вокруг λ_0 соответствует окно $\Delta\nu$, которое определяется по формуле:

$\Delta\nu = c \cdot \Delta\lambda / \lambda_0^2$. Если $\lambda_0 = 1300 \text{ нм}$ и $\Delta\lambda = 200 \text{ нм}$, то $\Delta\nu \approx 35 \text{ ТГц}$ ($35 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$), если же $\lambda_0 = 1550 \text{ нм}$ и $\Delta\lambda = 200 \text{ нм}$, то $\Delta\nu \approx 25 \text{ ТГц}$. Наиболее подходящим с точки зрения магистральных протяженных сетей является окно 1550 нм, поскольку в этом окне достигается минимальное затухание сигнала до 0,2 дБ/км, рис. 2.8. Несмотря на такие большие ресурсы волокна, реализовать передачу на скорости 25 Тбит/с в настоящее время невозможно, поскольку соответствующая частота модуляции пока не достижима. Однако есть другое очень эффективное решение, идея которого заключается в разделении всей полосы на каналы меньшей емкости. Каждый из таких каналов можно использовать под отдельное приложение. Эта технология из-

вестна как *волновое уплотнение* или *волновое мультиплексирование* – WDM. Технология WDM позволяет увеличить пропускную способность волокна не за счет увеличения частоты модуляции (при наличии одной передающей длины волны – одной несущей), а за счет добавления новых длин волн (новых несущих). Единственное условие, которое необходимо выполнить – это исключение перекрытий между спектральными каналами. Интервал между соседними длинами волн должен быть больше ширины спектра излучения. Современные одномодовые лазеры с распределенным брэгговским отражением – DBR лазеры – дают спектральную полосу меньше 0,1 нм. Так, при интервале 0,8 нм между соседними длинами волн в окне 1530-1560 нм, соответствующем рабочей области оптического усилителя EDFA, может разместиться около 40 длин волн – 40 каналов. Причем полоса пропускания на каждый канал достигает 10 Гбит/с и более [8]. Технически реализованы оптические передатчики на основе *временного мультиплексирования* – TDM, способные вводить в волокно оптический TDM сигнал с частотой 100 ГГц в расчете на один канал, в результате чего полная емкость одного волокна составляет 4 Тбит/с (при 40 каналах волнового уплотнения) [9]. Но передать такой сигнал на большие расстояния не просто. Одним из главных факторов, препятствующих этому, является дисперсия.

Дисперсия и полоса пропускания

По оптическому волокну передается не просто световая энергия, но также полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, в процессе распространения расплываются. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.

Дисперсия¹ – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины L по формуле $\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}$ [10]. Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами, рассматриваемыми ниже:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовой дисперсией τ_{mod}),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией τ_w),
- свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией τ_{mat}).



Рис. 2.9. Виды дисперсии

Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну. Результирующая дисперсия τ определяется из формулы:

$$\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{chr}^2 = \tau_{mod}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2. \quad (2-13)$$

¹ В более узком смысле в оптике под этим термином понимается зависимость показателя преломления вещества от частоты световой волны.

Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения у мод, и имеет место только в многомодовом волокне (рис. 2.3 а, б). Для ступенчатого многомодового волокна и градиентного многомодового волокна с параболическим профилем показателя преломления (2-9) ее можно вычислить соответственно по формулам:

$$\tau_{\text{mod step}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad \tau_{\text{mod grad}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (2-14) / (2-15)$$

где L_c – длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5 км, для градиентного – порядка 10 км).

Изменение закона дисперсии с линейного на квадратичный связано с неоднородностями, которые есть в реальном волокне. Эти неоднородности приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. При $L > L_c$ наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2 км и значительно меньше длины межмодовой связи. Поэтому можно пользоваться линейным законом дисперсии.

Вследствие квадратичной зависимости от Δ значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином *полоса пропускания*. При расчете полосы пропускания W можно воспользоваться формулой [1]:

$$W = 0,44/\tau. \quad (2-16)$$

Измеряется полоса пропускания в МГц·км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл W – это максимальная частота (частота модуляции) передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda). \quad (2-17)$$

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны [1]:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (2-18)$$

где введены коэффициенты $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$ – удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно, а $\Delta\lambda$ (нм) – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материаль-

ной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $B(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется *длиной волны нулевой дисперсии* λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.

Фирма Corning использует следующий метод определения удельной хроматической дисперсии. Измеряются задержки по времени при распространении коротких импульсов света в волокне длиной не меньше 1 км. После получения выборки данных для нескольких длин волн из диапазона интерполяции (800-1600 нм для MMF, 1200-1600 нм для SF и DSF) делается повторная выборка измерения задержек на тех же длинах волн, но только на коротком эталонном волокне (длина 2 м). Времена задержек, полученных на нем, вычитаются из соответствующих времен, полученных на длинном волокне.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного волокна используется эмпирическая формула Селмейера (Sellmeier, [4]): $\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}$. Коэффициенты A, B, C являются подгоночными, и выбираются так, чтобы экспериментальные точки лучше ложились на кривую $\tau(\lambda)$, рис. 2.10. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_0(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)/4, \quad (2-19)$$

где $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$ – длина волны нулевой дисперсии, новый параметр $S_0 = 8B$ – наклон нулевой дисперсии (размерность пс/(нм²·км), а λ – рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

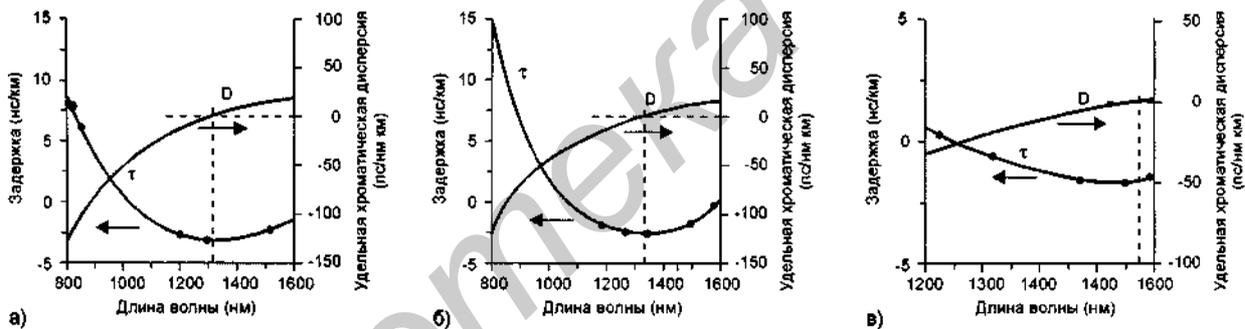


Рис. 2.10. Кривые временных задержек и удельных хроматических дисперсий для:
 а) многомодового градиентного волокна (62,5/125);
 б) одномодового ступенчатого волокна (SF);
 в) одномодового волокна со смещенной дисперсией (DSF)

Для волокна со смещенной дисперсией эмпирическая формула временных задержек записывается в виде $\tau(\lambda) = A + B\lambda + C\lambda \ln \lambda$, а соответствующая удельная дисперсия определяется как

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = B + C + C \ln \lambda = \lambda_0 S_0 \ln(\lambda/\lambda_0), \quad (2-19)$$

со значениями параметров $\lambda_0 = e^{-(1+B/C)}$ и $S_0 = C/\lambda_0$, где λ – рабочая длина волны, λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, и S_0 – наклон нулевой дисперсии.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением $\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника. К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излу-

ния, например лазерных передатчиков ($\Delta\lambda \approx 2$ нм), и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии. В табл. 2.4 представлены дисперсионные свойства различных оптических волокон.

Таблица 2.4. Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	λ , нм	Межмодовая дисперсия, пс/км τ_{mod}	Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км) $D(\lambda)$	Результирующая удельная полоса пропускания, МГц·км, $W = 0,44/\tau$ $1/\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\Delta\lambda \cdot D(\lambda))^2 /$		
				$\Delta\lambda = 2$ нм	$\Delta\lambda = 4$ нм	$\Delta\lambda = 35$ нм
MMF 50/125	850	414 ¹⁾	99,6 ³⁾	958	766	125
	1310	414	1,0	1062	1062	1050
	1550	414	19,2	1058	1044	540
MMF 62,5/125	850	973 ²⁾	106,7 ⁴⁾	441	414	114
	1310	973	4,2	452	452	450
	1550	973	17,3	451	450	384
SF 8/125	1310	0	< 1,8 ⁵⁾	> 120000	61000	6900
	1550	0	17,5	12600	6300	720
DSF 8/125	1310	0	21,2 ⁶⁾	10400	5200	594
	1550	0	< 1,7	> 120000	65000	7400

¹⁾ - на основе формулы (2-14), $\Delta=0,013$, $n_1=1,47$

²⁾ - на основе формулы (2-14), $\Delta=0,02$, $n_1=1,46$

³⁾ - на основе формулы (2-19), $\lambda_0=1297+1316$ нм, $S_0 \leq 0,101$ пс/(нм²·км)

⁴⁾ - на основе формулы (2-19), $\lambda_0=1322+1354$ нм, $S_0 \leq 0,097$ пс/(нм²·км)

⁵⁾ - на основе формулы (2-19), $\lambda_0=1301,5+1321,5$ нм, $S_0 \leq 0,092$ пс/(нм²·км)

⁶⁾ - на основе формулы (2-19), $\lambda_0=1535+1565$ нм, $S_0 \leq 0,085$ пс/(нм²·км)

Технические характеристики взяты у волокон, производимых фирмой Corning.

Для того, чтобы при передаче сигнала сохранялось его приемлемое качество – соотношение сигнал/шум было не ниже определенного значения – необходимо, чтобы полоса пропускания волокна на длине волны передачи превосходила частоту модуляции. Ниже приводятся примеры расчета допустимой длины сегмента с использованием табл. 2.4.

Пример 2.1. Стандарт Ethernet для многомодового волокна. Оптический интерфейс 10Base-FL предполагает манчестерское кодирование с частотой модуляции 20 МГц. При использовании светодиодов с $\Delta\lambda = 35$ нм (850 нм) удельная полоса пропускания для волокна 50/125 составляет 125 МГц·км и при длине оптического сегмента 4 км будет 31 МГц, что больше 20 МГц. То есть, с точки зрения дисперсии, протяженность в 4 км является допустимой при указанной характеристике оптического передатчика и при данном типе волокна. Однако по затуханию, которое на этой длине волны составляет 3 дБ/км, динамического диапазона у стандартных приемопередатчиков на это расстояние может не хватить. Стандартом Ethernet 10Base-FL установлено допустимое расстояние 2 км с учетом менее строгих требований как к характеристикам кабельной системы (например волокно 62,5/125, наличие нескольких сухих соединительных стыков), так и к оптическим приемопередатчикам – оптическим трансиверам Ethernet (например $\Delta\lambda = 50$ нм).

Пример 2.2. Стандарт FDDI для многомодового волокна. Оптический интерфейс FDDI PMD предполагает кодировку 4В/5В с частотой модуляции 125 МГц. При использовании светодиодов с $\Delta\lambda = 35$ нм (1310 нм) удельная полоса пропускания для волокна 62,5/125 составляет 450 МГц·км, и при длине оптического сегмента 2 км будет 225 МГц, что больше 125 МГц, то есть, с точки зрения дисперсии, протяженность в 2 км является допустимой, что находится в полном соответствии со стандартом FDDI PMD на многомодовое волокно.

Слабая зависимость полосы пропускания многомодового волокна (например 62,5/125) от спектральной ширины источника излучения, работающего на длине волны 1310 нм (450 МГц·км

при $\Delta\lambda = 35$ нм, и 452 МГц·км при $\Delta\lambda = 2$ нм), объясняется незначительной долей хроматической дисперсии по сравнению с межмодовой в силу близости рабочей длины волны к длине волны нулевой дисперсии. Таким образом, технические требования к спектральной полосе оптических передатчиков для работы по многомодовому волокну на длине 1310 нм обычно слабые.

Пример 2.3. Стандарт Fast Ethernet для одномодового волокна. Оптический интерфейс 100Base-FX аналогично FDDI предполагает кодировку 4В/5В с частотой модуляции 125 МГц. При использовании лазеров с $\Delta\lambda = 2$ нм (1310 нм) удельная полоса пропускания для ступенчатого одномодового волокна 8/125 составляет более 120000 МГц·км и при длине оптического сегмента 100 км будет 1200 МГц, что больше 125 МГц. То есть, с точки зрения дисперсии, протяженность в 100 км является допустимой, однако здесь уже начинает сказываться затухание. При динамическом диапазоне 25 дБ с учетом потерь на сухих соединениях и сварках при затухании в волокне 0,4 дБ/км получаем максимальное расстояние 62,5 км.

Уменьшить потери можно, если передавать сигнал на длине волны 1550 нм. По потерям при прежнем динамическом диапазоне 25 дБ и при условии, что волокно имеет затухание 0,25 дБ/км, получаем расстояние 100 км. По дисперсии при использовании лазеров с $\Delta\lambda = 2$ нм (1310 нм) удельная полоса пропускания для ступенчатого одномодового волокна 8/125 составляет 12600 МГц·км. В итоге на дистанции 100 км полоса пропускания будет 126 МГц, что сравнимо с частотой модуляции Fast Ethernet. Это не очень надежно. При фиксированной спектральной полосе $\Delta\lambda = 2$ нм затруднения можно снять, если использовать для передачи волокно со смещенной дисперсией DSF. Если же кабельная система представлена исключительно одномодовыми волокнами со ступенчатым профилем (SF), то следует использовать оптические передатчики с более узкой спектральной полосой, например $\Delta\lambda = 1$ нм.

Пример 2.4. Стандарт ATM 622 Мбит/с (STM-4) для одномодового волокна. Оптический интерфейс ATM 622 Мбит/с использует кодировку 8В/10В, что соответствует частоте модуляции 778 МГц. При использовании лазера с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) удельная полоса пропускания для ступенчатого одномодового волокна 8/125 составляет 252000 МГц·км (12600 × 20) и при длине оптического сегмента 100 км будет 2520 МГц, что значительно больше 778 МГц. То есть, с точки зрения дисперсии, при использовании лазера с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) протяженность в 100 км является допустимой, даже если применяется стандартное ступенчатое волокно.

Пример 2.5. Передача супер-сигнала на частоте 100 ГГц по одномодовому волокну со смещенной дисперсией DSF. При использовании лазеров с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) удельная полоса пропускания для DSF 8/125 составляет более 2400 ГГц·км (20 × 120000 МГц·км) и при длине оптического сегмента 20 км будет 120 ГГц, что незначительно превосходит 100 ГГц. То есть, с точки зрения дисперсии, протяженность сегмента в 20 км находится на грани предельного допустимого расстояния. Именно поэтому оптические супер-сети со скоростью передачи на канал 100 Гбит/с имеют ограниченный масштаб, например масштаб города.

Поляризационная модовая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия τ_{pmd} – возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды. Коэффициент удельной дисперсии T нормируется в расчете на 1 км и имеет размерность (пс/√км), а τ_{pmd} растет с ростом расстояния по закону $\tau_{\text{pmd}} = T \cdot \sqrt{L}$. Для учета вклада в результирующую дисперсию следует добавить слагаемое τ_{pmd}^2 в правую часть (2-13) Из-за небольшой величины τ_{pmd} может проявляться исключительно в одномодовом волокне, причем когда используется передача широкополосного сигнала (полоса пропускания 2,4 Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной полосой излучения 0,1 нм и меньше. В этом случае хроматическая дисперсия становится сравнимой с поляризационной модовой дисперсией

В одномодовом волокне в действительности может распространяться не одна мода, а две фундаментальные моды – две перпендикулярные поляризации исходного сигнала. В идеальном волокне, в котором отсутствуют неоднородности по геометрии, две моды распространялись бы с одной и той же скоростью, рис. 2.11 а. Однако на практике волокна имеют не

идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных составляющих мод, рис. 2.11 б.

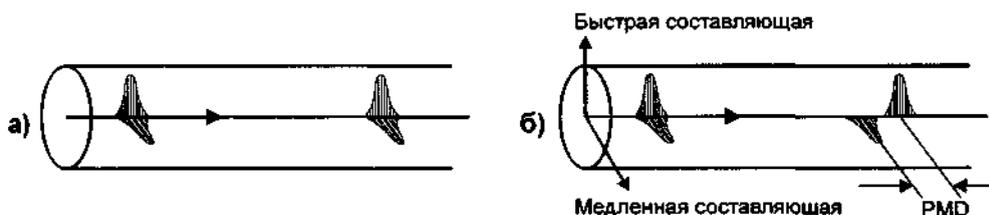


Рис. 2.11. Появление поляризационной модовой дисперсии [11]

Избыточный уровень τ_{pmd} , проявляясь вместе с чирпированным² модулированным сигналом от лазера, а также поляризационной зависимостью потерь, может приводить к временным колебаниям амплитуды аналогового видеосигнала. В результате ухудшается качество изображения, или появляются диагональные полосы на телевизионном экране. При передаче цифрового сигнала высокой полосы (>2,4 Гбит/с) из-за наличия τ_{pmd} может возрастать битовая скорость появления ошибок.

Главной причиной возникновения поляризационной модовой дисперсии является нециркулярность (овальность) профиля сердцевинки одномодового волокна, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. При изготовлении волокна только строгий контроль позволяет достичь низких значений этого параметра.

Пример 2.6. Оценить расстояние L_0 , при котором хроматическая τ_{chr} и поляризационная модовая дисперсии τ_{pmd} сравниваются по величине, если коэффициент хроматической дисперсии $D = 2$ пс/(нм·км), коэффициент поляризационной модовой дисперсии $T = 0,5$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$, а ширина спектрального излучения $\Delta\lambda = 0,05$ нм.

Приравнявая выражения $\tau_{\text{chr}} = D\Delta\lambda L$ и $\tau_{\text{pmd}} = T\sqrt{L}$, находим $L_0 = (T/D\Delta\lambda)^2 = 25$ км. Если при $L > L_0$ поляризационной модовой дисперсией можно пренебречь, то при $L < L_0$, наоборот, ее следует строго учитывать. Проблема поляризационной модовой дисперсии возникает при обсуждении проектов построения супермагистралей (>100 Гбит/с) городского масштаба.

Пример 2.7. Оценить максимальное допустимое расстояние оптического сегмента L_{max} , на которое можно передать одноканальный сигнал с частотой $W = 100$ ГГц без ретрансляции, исходя из ограничений, вносимых поляризационной модовой дисперсией, если коэффициент поляризационной модовой дисперсии $T = 1,0$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$.

На основании соотношения (2-16) получаем: $\tau_{\text{pmd}} = T\sqrt{L} < 0,44/W$. Отсюда $L_{\text{max}} = (0,44/WT)^2 = (0,44/(100 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-12}))^2 \approx 19$ км. При $T = 0,5$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$ расстояние возрастает до 77 км.

Ведущие фирмы-производители волокна обеспечивают выходной параметр поляризационной модовой дисперсии не выше 0,5. Однако, следует учитывать, что после инсталляции кабельной системы значение этого параметра возрастает.

² Чирпированная модуляция (тех.) - это модуляция, нестабильная по амплитуде или частоте. Выходной сигнал при такой модуляции принято называть чирпированным модулированным сигналом (chirp-modulated signal).

2.3. Характеристики поставляемых волокон

Среди множества мировых производителей оптического волокна выделяются три крупнейших: Corning Optical Fiber, Lucent Technologies и Alcoa Fujikura. Кроме того, существуют сотни менее крупных производителей волокна. Волокна проходят тестирование как на этапе производства, так и после изготовления. Основные индустриально принятые методы тестирования, используемые для определения характеристик производимых волокон, приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Основные методы тестирования волокон [12]

Параметры волокна	Методика теста EIA/TIA	Методика теста IEC
Затухание	EIA/TIA-455-78	IEC 793-1-C1A или IEC 793-1-C1C
Точка разрыва	EIA/TIA-455-59	IEC 793-1-C1C
Затухание при макроизгибе	EIA/TIA-455-62	IEC 793-1-C11
Кабельная длина отсечки	EIA/TIA-455-170	IEC 793-1-C7B
Хроматическая дисперсия	EIA/TIA-455-175	IEC 793-1-C5C
Поляризационная модовая дисперсия	EIA/TIA-455-113-122	*
Диаметр модового поля	EIA/TIA-455-164 или EIA/TIA-455-167	IEC 793-1-C9A или IEC 793-1-C9B
Диаметр оболочки	EIA/TIA-455-176	IEC 793-1-A2
Нециркулярность оболочки	EIA/TIA-455-176	IEC 793-1-A2
Ошибка концентричности сердцевина/оболочка	EIA/TIA-455-176	IEC 793-1-A2
Геометрия покрытия волокна	EIA/TIA-455-173	IEC 793-1-A3
Сила очистки волокна от покрытия	EIA/TIA-455-178	IEC 793-1-B6
Тест проба	EIA/TIA-455-31	IEC 793-1-B1
Сила растяжения	EIA/TIA-455-28	IEC 793-1-B2A, B2B
Скрутка волокна	EIA/TIA-455-111	*
Длина	EIA/TIA-455-60	IEC 793-1-C1C
Рабочий диапазон температур	EIA/TIA-455-89	*
Цикл температуры	EIA/TIA-455-3	IEC 793-1-D1
Цикл температуры/влажности	EIA/TIA-455-72-73	*
Погружение в жидкость	EIA/TIA-455-74-75	*
Высокотемпературное старение	EIA/TIA-455-67-70	*
Динамическая усталость	EIA/TIA-455-76	IEC 793-1-B7A
Статическая усталость	EIA/TIA-455-97	IEC 793-1-B7D

* В настоящее время нет методики теста IEC для этих параметров

Градиентное многомодовое волокно

Широко используются два стандарта многомодового градиентного волокна – 62,5/125 и 50/125, отличающиеся профилем сердцевины, рис. 2.12 а. Соответствующие спектральные потери для типичных волокон показаны на рис. 2.12 б.

В табл. 2.6 приведены основные характеристики многомодовых градиентных волокон двух основных стандартов 50/125 и 62,5/125.

Отметим, что полоса пропускания на длине волны 1300 нм превосходит соответствующее значение на длине волны 850 нм. Это объясняется следующим образом. Дисперсия, которая определяет полосу пропускания, состоит из межмодовой и хроматической составляющих.

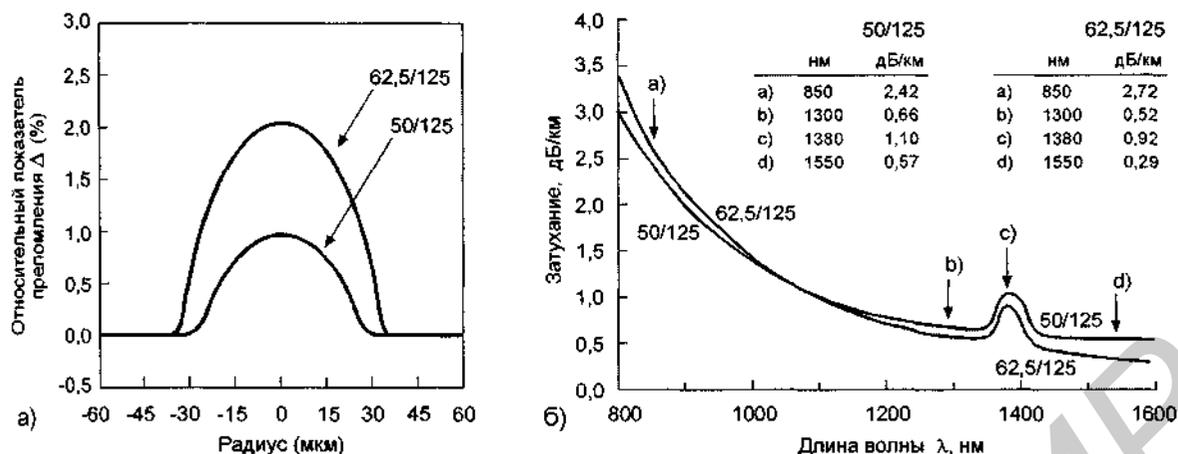


Рис. 2.12. Многомодовые градиентные волокна: а) профили показателей преломления волокон 50/125 и 62,5/125; б) характерные кривые спектральных потерь мощности

Таблица 2.6. Значения параметров градиентных многомодовых волокон

Параметры	Градиентное многомодовое волокно	
	MMF 50/125	MMF 62,5/125
Номинальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	$\leq 2,4$	$\leq 2,8$
Номинальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,5$	$\leq 0,6$
Максимальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	$\leq 2,5$	$\leq 3,0$
Максимальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,8$	$\leq 0,7$
Полоса пропускания на длине волны 850 нм (МГц·км)	≥ 400	≥ 200
Полоса пропускания на длине волны 1300 нм (МГц·км)	≥ 800	≥ 400
Длина волны нулевой дисперсии, λ_0 (нм)	1297–1316	1332–1354
Наклон нулевой дисперсии, S_0 (пс/(нм ² ·км))	$\leq 0,101$	$\leq 0,097$
Диаметр сердцевины, d (мкм)	$50,0 \pm 3,0$	$62,5 \pm 3,0$
Числовая апертура, NA	$0,200 \pm 0,015$	$0,275 \pm 0,015$
Рабочий диапазон температур	$-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$	$-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$
Вносимое затухание в температурных пределах $-60^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$ на длинах волн 850 нм и 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$
Вносимое затухание в температурных пределах $-10^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$, влажности до 98% на длинах волн 850 нм и 1300 нм (дБ/км)	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$
Стандартная длина волокна, поставляемого на катушке (м)	1100–4400	1100–8800
Диаметр оболочки (мкм)	$125,0 \pm 2,0$	$125,0 \pm 2,0$
Радиальное отклонение сердцевины относительно оболочки (мкм)	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$
Диаметр защитного покрытия (мкм)	245 ± 10	245 ± 10
Отклонение сердцевины от окружности	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Тестовое усилие на разрыв (Гн/м ²)	$\geq 0,7$	$\geq 0,7$
Эффективный показатель преломления n_{eff} на длине волны 850 нм	1,4897	1,5014
Эффективный показатель преломления n_{eff} на длине волны 1300 нм	1,4856	1,4966

Если межмодовая дисперсия слабо зависит от длины волны – в соотношениях (2-14), (2-15) зависимостью показателя преломления от длины волны можно пренебречь, то хроматическая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения. Коэффициент пропорциональности $D(\lambda)$ при длинах волн в окрестности 1300 нм (λ_0) близок к нулю, в то время как на длине волны 850 нм примерно равен 100 пс/(нм²·км). Специфика использования многомодового волокна такова, что обычно в качестве передатчиков используются светоизлучающие диоды, имеющие уширения спектральной линии излучения благодаря некогерентности источника примерно $\Delta\lambda \sim 50$ нм, в отличие от лазерных диодов с уширением $\Delta\lambda \sim 2$ нм и меньше. Это приводит к тому, что хроматическая дисперсия на длине волны 850 нм начинает играть существенную роль наряду с межмодовой дисперсией. Значительно уменьшить хроматическую дисперсию можно при использовании лазерных передатчиков, имеющих значительно меньшее спектральное уширение. Воспользоваться этим преимуществом лазерных передатчиков можно только при использовании одномодового волокна в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм, когда полностью отсутствует межмодовая дисперсия и остается только хроматическая дисперсия.

Функциональные свойства одномодовых волокон

С точки зрения дисперсии, существующие одномодовые волокна, которые широко используются в сетях сегодня, разбиваются на три основных типа: волокна с несмещенной дисперсией SF (стандартные волокна со ступенчатым профилем, рис. 2.13 а), волокна со смещенной дисперсией DSF (рис. 2.13 б) и волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF.

Все три типа волокон очень близки по затуханию в окнах одномодовой передачи 1310 и 1550 нм, но отличаются характеристиками хроматической дисперсии. Поскольку дисперсия влияет на максимальную допустимую длину безретрансляционных участков, то на первый взгляд, естественно, возникает желание выбрать волокно с наименьшим возможным значением дисперсии применительно к конкретной задаче, к конкретной длине волны. Это справедливо для случая передачи одной длины волны – одноканальной передачи. Многоканальное волновое мультиплексирование (WDM) в окне 1550 нм диктует иной рационализм. Исследования показывают, что, когда длина волны нулевой дисперсии попадает в зону мультиплексного сигнала, начинают проявляться нежелательные интерференционные эффекты, приводящие к более быстрой деградации сигнала. Поэтому поставщики средств связи должны отчетливо представлять себе преимущества и недостатки каждого волокна в аспекте эволюции традиционных сетей к полностью оптическим сетям [13].

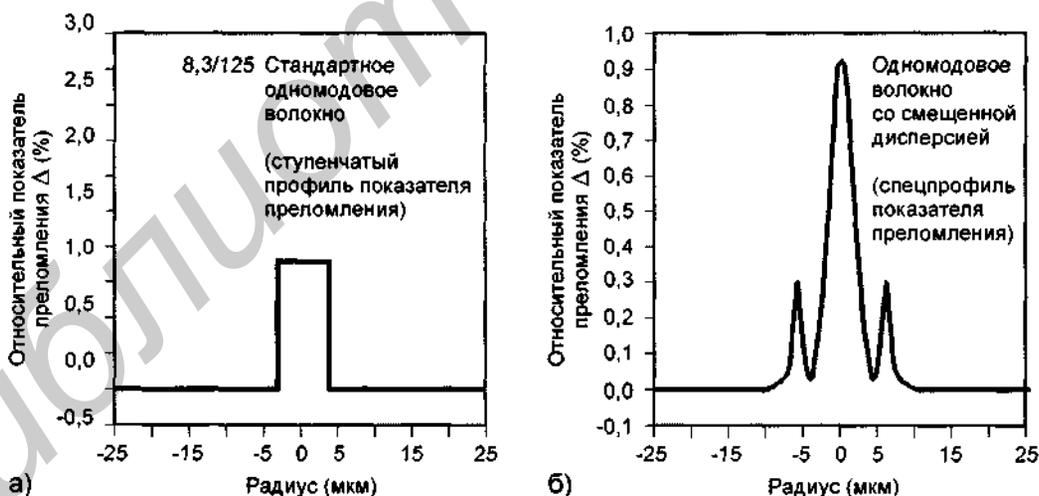


Рис. 2.13. Профили показателей преломления наиболее распространенных одномодовых волокон: а) ступенчатое одномодовое волокно (стандартное волокно); б) одномодовое волокно со смещенной дисперсией (волокно со специальным профилем)

Волокно SF. В начале 80-х годов передатчики на длину волны 1550 нм имели очень высокую цену и низкую надежность и не могли конкурировать на рынке с передатчиками на дли-

ну волны 1300 нм. Поэтому стандартное ступенчатое волокно SF (рис. 2.13 а) стало первым коммерческим волокном и сейчас наиболее широко распространено в телекоммуникационных сетях. Оно оптимизировано по дисперсии для работы в окне 1310 нм, хотя и дает меньшее затухание в окне 1550 нм.

Волокно DSF. По мере совершенствования систем передачи на длине волны 1550 нм встает задача разработки волокна с длиной волны нулевой дисперсии, попадающей внутрь этого окна. В итоге в середине 80-х годов создается волокно со смещенной дисперсией DSF, полностью оптимизированное для работы в окне 1550 нм как по затуханию, так и по дисперсии. На протяжении многих лет волокно DSF считается самым перспективным волокном. С приходом более новых технологий передачи мультимплексного оптического сигнала большую роль начинают играть эрбиевые оптические усилители типа EDFA, способные усиливать многоканальный сигнал. К сожалению, более поздние исследования (в начале 90-х годов) показывают, что именно длина волны нулевой дисперсии (1550 нм), попадающая внутрь рабочего диапазона эрбиевого усилителя, является главным потенциальным источником нелинейных эффектов (прежде всего, четырехволнового смешивания), которые проявляются в резком возрастании шума при распространении многоканального сигнала.

Дальнейшие исследования подтверждают ограниченные возможности DSF при использовании в системах WDM. Чтобы избежать нелинейных эффектов при использовании DSF в WDM системах, следует вводить сигнал меньшей мощности в волокно, увеличивать расстояние между каналами и избегать передачи парных каналов (симметричных относительно λ_0).

Четырехволновое смешивание – это эффект, приводящий к рассеянию двух волн с образованием новых нежелательных длин волн. Новые волны могут приводить к деградации распространяемого оптического сигнала, интерферируя с ним, или перекачивать мощность из полезного волнового канала. Именно из-за эффекта четырехволнового смешивания стало ясно, что необходимо разработать новый тип волокна, в котором λ_0 располагалось бы вдали, то есть, по одну сторону (левее или правее) от всех возможных каналов

Волокно NZDSF создается в начале 90-х годов с целью преодолеть недостатки волокна DSF, проявляющиеся при работе с мультимплексным оптическим сигналом. Известное также как λ -смещенное волокно, оно имеет особенность в том, что длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы полосы пропускания эрбия. Это уменьшает нелинейные эффекты и увеличивает характеристики волокна при передаче DWDM сигнала.

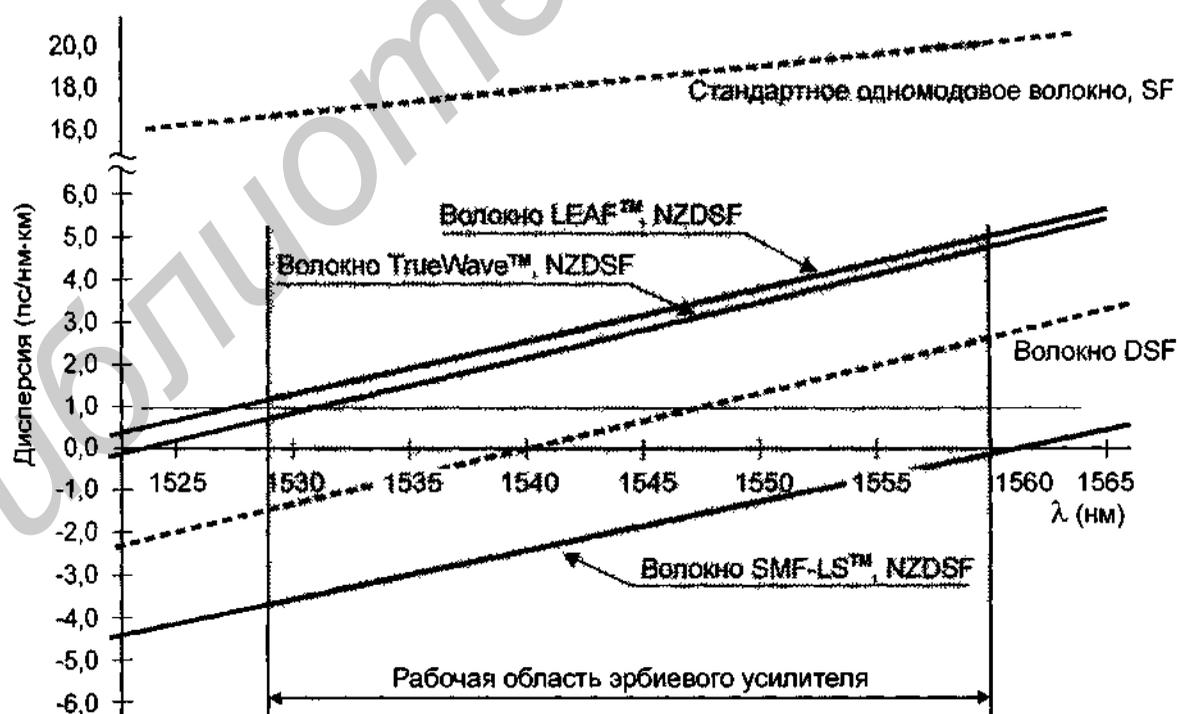


Рис. 2.14. Хроматическая дисперсия одномодовых волокон в окне 1550 нм

Две марки λ -смещенного волокна, появившиеся несколько лет назад, широко используются сегодня: волокно TrueWave фирмы Lucent Technologies [14] и волокно SMF-LS фирмы Corning [15, 16]. Оба имеют ненулевую дисперсию во всем диапазоне полосы пропускания эрбия. Волокно TrueWave обеспечивает положительную дисперсию при точке нулевой дисперсии в районе 1523 нм, в то время как SMF-LS обеспечивает отрицательную дисперсию с точкой нулевой дисперсией чуть выше 1560 нм, рис. 2.14. В начале 1998 года фирма Corning выпустила еще одну марку λ -смещенного волокна – LEAF™ [15]. Сравнительный анализ основных характеристик волокон TrueWave, SMF-LS и LEAF приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Сравнительные характеристики трех NZDSF волокон: TrueWave [14] и SMF-LS, LEAF [15]

Характеристики	TrueWave™	SMF-LS™	LEAF™
Главное рабочее окно (нм)	1550	1550	1550
Затухание			
Максимальное затухание на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0,22-0,25	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$
Максимальное затухание на длине волны 1310 нм (дБ/км)	н/д	$\leq 0,5$	н/д
Максимальное затухание в диапазоне 1525-1575 нм (дБ/км)	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$
Затухание на пике ОН-1383 ± 3 нм (дБ/км)	$\leq 1,0$	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$
Затухание при изгибе на длине волны 1550 нм (дБ)	$\leq 0,50$ (1 виток $\varnothing 32$ мм) $\leq 0,05$ (100 витков $\varnothing 75$ мм)	$\leq 0,50$ (1 виток $\varnothing 32$ мм) $\leq 0,05$ (100 витков $\varnothing 75$ мм)	н/д
Затухание на сухом стыке при длине волны 1550 нм (дБ)	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$	н/д
Хроматическая дисперсия в зоне ненулевой дисперсии			
min (пс/нм·км)	0,8 (зона 1540-60 нм)	н/д	1,0 (1540-60 нм)
max (пс/нм·км)	4,6 (зона 1540-60 нм)	-3,5 (зона 1530-1560 нм)	6,0 (1540-60 нм)
Наклон нулевой дисперсии S_0 (пс/(нм ² км))	н/д	$\leq 0,092$	н/д
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 (нм)	≤ 1540	≥ 1560	н/д
Диаметр модового поля при длине волны 1550 нм (нм)	$8,4 \pm 0,6$	$8,4 \pm 0,5$	$9,5 \pm 0,5$ 9,6 (типовое)
Кабельная длина волны отсечки $\lambda_{\text{ССФ}}$ (нм)	≤ 1260	≤ 1260	н/д
Поляризационная модовая дисперсия (пс/ $\sqrt{\text{км}}$)	$\leq 0,5$ при 1550 нм (max) $\leq 0,1$ при 1550 нм (типовое)	$\leq 0,5$ при 1550 нм (max)	$\leq 0,08$ при 1550 нм (типовое)

н/д – нет данных

По дисперсионным характеристикам волокно LEAF близко к волокну TrueWave. Главной отличительной чертой этого волокна по сравнению с двумя предыдущими является большая эффективная площадь для светового потока – диаметр модового пятна возрос на 1 мкм. Ве-

личина этого параметра становится весьма важной для оптимизации систем диапазона 1550 нм. Большой диаметр модового пятна позволяет увеличить уровень мощности излучения вводимого волокна на 2 дБ, сохраняя при этом влияние ряда нелинейных эффектов, в особенности четырехволнового смешивания, на прежнем уровне.

Современные тенденции развития средств телекоммуникационной связи свидетельствуют о перспективности систем передачи по волокну, в которых совмещаются временное мультиплексирование – TDM мультиплексирование (STM-16 на 2,4 Гбит/с и STM-64 на 10 Гбит/с) в пределах одной длины волны и волновое мультиплексирование WDM.

Хотя и последователи технологии волнового мультиплексирования (Lucent, MIT, Fujitsu и др.) уже широко тестируют в рамках испытательных сетей мультиплексирование 32 и более каналов в расчете на одно волокно, добившись уже скорости передачи 40 Гбит/с на расстояния в несколько сотен км, в ближайшей перспективе видится меньшее количество мультиплексных каналов (до 16 при скорости передачи до 2,4 и 10 Гбит/с) в крупномасштабном промышленном применении в телекоммуникационных сетях.

Инсталляция новых кабельных сегментов, или наращивание существующих с учетом перехода на скорости передачи 2,4 и 10 Гбит/с может осуществляться с использованием трех перечисленных видов волокон. При выборе волокна следует учитывать такие факторы, как общая стоимость проекта, требуемые емкости каналов, надежность, сложность системы и др.

В контексте эволюции ВОЛС ключевыми параметрами становятся методики, используемые для коррекции дисперсии в волоконно-оптических системах. *Коррекция дисперсии* позволяет увеличивать длину волоконно-оптических TDM систем, ранее ограниченных из-за большой дисперсии, и одновременно избежать влияния такого эффекта, как четырехволновое смешивание. Три методики коррекции дисперсии следующие [17]:

- Использование волокон с компенсирующей дисперсией DCF (dispersion-compensating fibers). Положительная дисперсия, накопленная на одном участке с использованием стандартного волокна SF, может компенсироваться последующим примыкающим сегментом на основе волокна DCF с заранее подобранным значением отрицательной дисперсии, в результате чего итоговая хроматическая дисперсия может быть приближена к нулю. Компенсация хроматической дисперсии допустима в силу систематического характера накопления дисперсии с ростом длины;
- Использование оптических лазерных передатчиков с очень узкой спектральной шириной (0,1 нм и менее), способных модулировать излучение на частотах в несколько ГГц;
- Использование волокон типа NZDSF, в которых "сдвигается" длина волны нулевой дисперсии за пределы окна 1550 нм, в результате чего дисперсия становится достаточно большой, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, в то же время достаточно малой, чтобы поддерживать распространение сигнала высокой емкости (высокой частоты модуляции) на большие расстояния.

Сегменты на основе волокна SF без использования коррекции дисперсии допускают протяженность до 90 км (при скорости передачи 2,4 Гбит/с). Первые две методики коррекции дисперсии, применяясь отдельно друг от друга или в комбинации, позволяют увеличить протяженность сегментов до 140 км при сохранении прежней скорости передачи, табл. 2.8 а.

Чтобы удовлетворить рабочим требованиям при планировании сети, следует тщательно выработать стратегию наращивания сети. Нужно оценивать соответствующие топологии сетей с учетом возможности их работы на скоростях 2,4 и 10 Гбит/с. Ближайшая цель – построить протяженные участки (до 120-140 км) при передаче на скорости 2,4 Гбит/с с использованием любых из трех главных типов волокон – должна рассматриваться совместно с планами более далекой перспективы – инсталляция линий на скорость передачи 10 Гбит/с с использованием последовательно установленных линейных усилителей. Высокая скорость передачи в последнем случае может быть достигнута путем оптимизации длины сегментов между линейными усилителями (приблизительно 70 км).

Хотя волокна SF и DSF вполне приемлемы для осуществления наращивания сегментов сетей, волокно NZDSF более перспективно при использовании в новых инсталляциях. При сравнении волокон SF и DSF отметим, что SF лучше подходит для сетей, использующих волновое мультиплексирование. Недостаток SF – большое значение дисперсии в окне 1550 нм – может компенсироваться либо дополнительным участком на основе волокна с компенсирующей дисперсией, либо путем уменьшения спектральной ширины излучаемого сигнала (например, используя передатчики на основе DFB лазеров).

Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе SF, DSF и NZDSF приведены в табл. 2.8 а, б.

Таблица 2.8. Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе различных типов одномодовых волокон

а) Передача 2,5 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон

Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волокно	Коррекция дисперсии	Усилители EDFA	Число каналов	Емкость волокна	Длина пролета	Ограничения системы
SF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	70-90 км	Мощность, дисперсия
SF	Внешняя модуляция	УМ	1	2,4 Гбит/с	140 км	Мощность
SF	Компенсация дисперсии	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
DSF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
NZDSF	λ_0 выводится из зоны EDFA	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
Линейное усиление многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя модуляция	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато
SF	Компенсация дисперсии	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато
DSF	Нет	УМ, ЛУ	1-(нелин. эффекты)	2,4 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато, 4-wave mixing
NZDSF	λ_0 выводится из зоны EDFA	УМ, ЛУ	1, 2, 4, 8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует плато

б) Передача 10 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон

Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волокно	Коррекция дисперсии	Усилители EDFA	Число каналов	Емкость волокна	Длина пролета	Ограничения системы
SF	Внешняя модуляция	ПУ	1	10 Гбит/с	50-70 км	Дисперсия
SF	Внешняя модуляция + КД*	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-140 км	Мощность
DSF	Внешняя модуляция	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-149 км	Мощность
NZDSF	Внешняя модуляция, λ_0 выводится из зоны EDFA	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-149 км	Мощность
Линейное усиление многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя модуляция + КД*	ЛУ, УМ, ПУ	1, 2, 4	10, 20, 40 Гбит/с	>300 км	ASE, отсутствует плато
DSF	Внешняя модуляция	ЛУ, ПУ	1-(нелин. эффекты)	10 Гбит/с	>300 км	ASE, отсутствует плато, 4-wave mixing
NZDSF	Внешняя модуляция, λ_0 выводится из зоны EDFA	ЛУ, ПУ	1, 2, 4	10, 20, 40 Гбит/с	>300 км	ASE, SPM, отсутствует плато

* – Компенсация дисперсии может требовать дополнительного усиления, чтобы преодолеть затухание.

Обозначения: УМ – усиление мощности, ЛУ – линейное усиление, КД – компенсация дисперсии, ПУ – приемное усиление, ASE – спонтанно усиленное излучение (amplified spontaneous emission), 4-wave mixing – четырехволновое смешивание, SPM – межфазная модуляция (self-phase modulation)

3. Пассивные оптические компоненты

Пассивные оптические компоненты включают в себя оптические соединители, розетки, шнуры, распределительные панели, кроссовые шкафы, соединительные муфты, оптические разветвители, аттенюаторы, системы спектрального уплотнения и т.д., то есть все, что необходимо для обеспечения передачи оптического сигнала по волоконно-оптическому кабелю от передатчика к приемнику.

По мере роста сложности и увеличения протяженности волоконно-оптической кабельной системы роль пассивных компонентов возрастает. Практически все системы волоконно-оптической связи, реализуемые для магистральных информационных сетей, локальных вычислительных сетей, а также для сетей кабельного телевидения, охватывают сразу все многообразие пассивных волоконно-оптических компонентов.

Самым важным вопросом передачи информации по ВОЛС является обеспечение надежного соединения оптических волокон. Оптический соединитель – это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных модулей (приемников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптических кабелей между собой, а также с другими компонентами. Различают неразъемные и разъемные соединители. *Неразъемные соединители* используются в местах постоянного монтажа кабелей систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъемное соединение, является *сварка*. *Разъемные соединители* (широко употребляется термин *коннекторы*, connectors) допускают многократные соединения/разъединения. Промежуточное положение занимают соединения типа *механический сплайс*.

3.1. Разъемные соединители

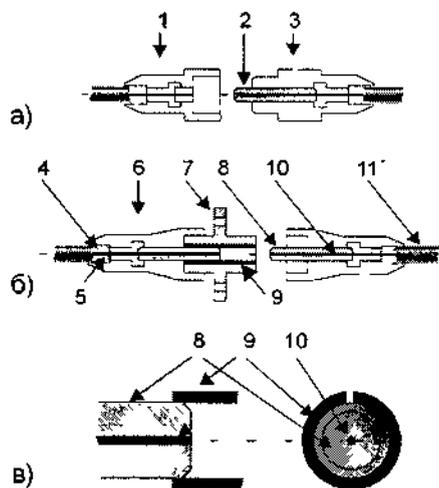
Типы конструкций

По конструкции соединения бывают симметричными и несимметричными [1]. Упрощенные схемы соединений показаны на рис. 3.1. При *несимметричной конструкции* для организации соединения требуется два элемента: соединитель гнездовой и соединитель штекерный, рис. 3.1 а. Оптическое волокно в капиллярной трубке коннектора-штекера не доходит до торца капилляра, а остается в глубине. Напротив, волокно в гнездовом соединителе выступает наружу. При организации соединения физический контакт волокон происходит внутри наконечника-капилляра, который обеспечивает соосность волокон. Открытое волокно, и капиллярная полость у этих соединителей являются основными недостатками, снижающими надежность несимметричной конструкции. Особенно недостатки сказываются при большом количестве переподключений. Поэтому такой тип конструкции получил меньшее распространение.

При *симметричной конструкции* для организации соединения требуется три элемента: два соединителя и переходная розетка (coupling), рис. 3.1 б. Главным элементом соединителя является наконечник (ferrule). Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде трубки с продольным разрезом – должен быть контакт между наконечником и центрирующим элементом розетки, рис. 3.1 в. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники и обеспечивает их строгую соосность.

Внешний диаметр наконечника равен 2,5 мм. Наиболее жесткие требования предъявляются к параметрам отверстия (капилляра) наконечника. Оно должно быть достаточно большим, чтобы волокно могло зайти в него, и при этом достаточно малым, чтобы люфт волокна был незначительным. Диаметр отверстия в соответствии со стандартом равен $126 +1/-0$ мкм для одномодового волокна и $127 +2/-0$ мкм для многомодового волокна. Некоторые производители поставляют наконечники широкого диапазона диаметров (например, 124, 125, 126, 127 мкм) для аккомодации естественных вариаций диаметров волокна. Наконечник, как самый прецизионный элемент соединителя, является самым дорогим. Наконечники обычно бывают металлические (на основе нержавеющей стали), керамические (на основе циркония или оксида алюминия). Пластиковые наконечники высокого качества должны снизить стоимость соединителя.

К соединителям предъявляются следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение характеристик после многократных повторных соединений.



Обозначения:

- 1 – соединитель гнездовой;
- 2 – наконечник-капилляр;
- 3 – соединитель штекерный;
- 4 – кевларовые нити;
- 5 – эпоксидный наполнитель;
- 6 – соединитель;
- 7 – переходная соединительная розетка (адаптер);
- 8 – оптический наконечник;
- 9 – центрирующий элемент розетки;
- 10 – оптическое волокно;
- 11 – миникабель

Рис. 3.1. Конструкции соединителей: а) несимметричная; б) симметричная; в) наконечник и центратор розетки симметричного соединителя

Вносимые потери

Коэффициент передачи оптической мощности (коэффициент прохождения) D при торцевом соединении определяется как $D = P_{out}/P_{in}$, а *вносимые потери* a – исходя из соотношения $a = -10 \lg D = -10 \lg P_{out}/P_{in}$ [дБ], где P_{in} и P_{out} соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Точный замер этих параметров на практике соответствует следующей процедуре. Сначала находят интенсивность на непрерывном участке волокна, что соответствует градуировке приемника (P_{in}). Затем разрывают волокно и после оконцевания соединителями мест разрыва вновь соединяют. Вторичный замер интенсивности соответствует P_{out} . Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединителей и составляют от 0,3 до 0,5 децибела. Вносимые потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединитель), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина/оболочка и концентричности сердцевин у волокон с разных сторон. Причем следует аддитивно учитывать все эти потери. Можно ожидать случайное изменение этих факторов даже в том случае, когда волокна одинакового стандарта или с одной и той же катушки. Эти факторы проявляются меньше на непрерывном сегменте оптического кабеля, так как они плавно меняются с длиной. На внутренние потери влияет технология производства волокна и соответствующие критерии контроля качества, а не конструктор соединителя. Зная разброс значений перечисленных выше параметров, можно определить максимальное значение внутренних потерь.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием чисто френелевского рассеяния и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как $a_F = -10 \lg(4n_1 n_2 / (n_1 + n_2)^2)$ [дБ], где n_1 и n_2 – показатели преломления волокон (зазора между волокнами нет). Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления. Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал NA_1 , больше апертуры волокна, принимающего сигнал NA_2 , и определяются как $a_{NA} = -10 \lg(NA_2/NA_1)^2$ [дБ]. При $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают. Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением $a_D = -10 \lg(D_2/D_1)^2$ [дБ], где D_1 и D_2 – диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При $D_1 < D_2$ потери не возникают.

Соединение волокон 62,5/125 и 50/125. Факт наличия двух основных широко распространенных стандартов многомодового градиентного волокна 50 мкм и 62,5 мкм нужно принять как свершившийся. Многомодовое волокно наибольшее применение имеет при строительстве локальных сетей. Российские заводы по производству волоконно-оптического кабеля более широко используют стандарт многомодового волокна с диаметром светонесущей жилы 50 мкм отечественного производства. Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит (мы пренебрегаем другими потерями). Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то только доля $(50/62,5)^2$ интенсивности света будет во втором волокне, что соответствует потерям 1,94 дБ. Этот факт учитывается при производстве оптических приемопередатчиков. Так, обычно светодиод передатчика рассчитан на волокно меньшего диаметра (50 мкм), а приемник в этом же устройстве на волокно большего диаметра (62,5 мкм). В этом случае не является строго обязательным использование в кабельном сегменте, соединяющем такие устройства, стандарта волокна 62,5/125, рекомендованного спецификацией ANSI/TIA/EIA-568A [2].

Более того, многие сетевые стандарты закладывают большой запас по затуханию в кабельной системе. Например, стандарты физического уровня на многомодовое волокно FDDI (PMD), Fast Ethernet (100Base-FX) рассчитаны на максимальное допустимое затухание в линии до 11 дБ при максимальном допустимом расстоянии 2 км. Если учесть, что потери в кабеле составляют 3 дБ/км, а в соединителе с однотипными волокнами – 0,5 дБ, то один дополнительный переход с 62,5 на 50 мкм, вносящий затухание 2,5 дБ, не будет критичным даже при максимальной длине кабельного сегмента (2 км).

Соединение многомодового и одномодового волокон. Еще большие внутренние потери (примерно 16 дБ) возникают при сопряжении многомодового и одномодового волокна, когда свет распространяется из первого во второе волокно.

Внешние потери – это потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки оптического шнура. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка (угловое смещение θ , радиальное смещение L , осевое смещение S); шероховатости на торце сердцевин; загрязнение участка между торцами волокон, рис. 3.2.

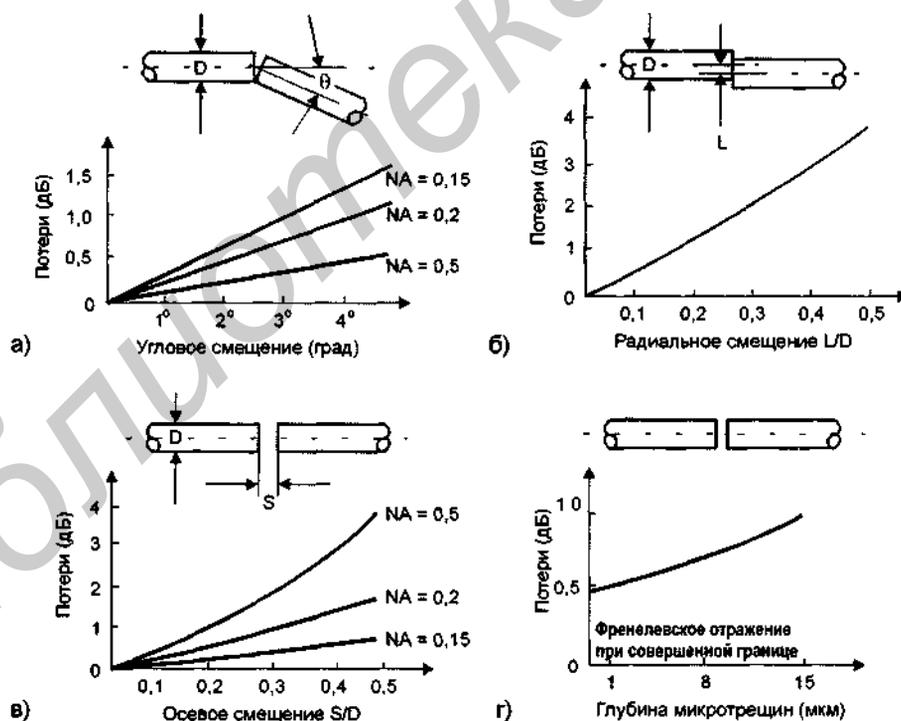


Рис. 3.2. Четыре главных вида внешних потерь в соединителе [3]: а) потери при угловом смещении; б) потери при радиальном смещении; в) потери при осевом смещении; г) потери из-за френелевского рассеяния на неоднородностях

Потери при угловом θ , радиальном L и осевом S смещениях определяются соответственно формулами (рис. 3.2 а, б, в) [1, 4]:

$$a_{\theta} = -10 \lg \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{\theta}{\arcsin NA} \right) \text{ [дБ]}, \quad (3-1)$$

$$a_L = -10 \lg \left[1 - \frac{4}{\pi} \frac{L}{D} \right] \text{ [дБ]}, \quad (3-2)$$

$$a_S = -10 \lg \left[1 / \left(1 + 2(S/D) \operatorname{tg} [\arcsin(NA/n_0)] \right)^2 \right] \text{ [дБ]}, \quad (3-3)$$

где NA – апертура волокна, D – диаметр светонесущей части волокна, L – радиальное смещение, S – осевое смещение, n_0 – показатель преломления среды, заполняющей пространство стыка.

Некачественная полировка торцов волокон, а также трение, возникающее при многократном переключении соединителей (имеющих физический контакт), может привести еще к одному типу потерь – потерь, связанных с рассеянием на микротрещинах (рис. 3.2 г).

Приведенное соотношение для потерь при осевом смещении учитывает только фактор апертурной расходимости светового потока. Однако при появлении зазора между волокнами

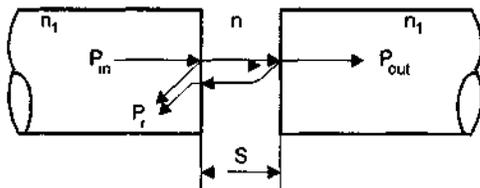


Рис. 3.3. Френелевское отражение

появляется и френелевское отражение из-за того, что среда, заполняющая пространство между открытыми плоскостями торцов волокон имеет отличный от волокон показатель преломления, рис. 3.3.

С учетом двух скачков показателей преломления коэффициент прохождения определяется из соотношения:

$$D_F = \frac{4n_1^2 n^2}{4n_1^2 n^2 + (n_1^2 - n^2)^2 \sin^2(2\pi n S / \lambda)} \quad (3-4)$$

При величине зазора, сравнимой с длиной волны или большей, по осцилляциям синуса можно произвести усреднение. Тогда потери определяются как $a_F = -10 \lg \bar{D}_F = -10 \lg \left(2n_1 n / (n_1^2 + n^2) \right)$ [дБ],

где n_1 – показатель преломления волокна ($\approx 1,5$), одинаковый для обеих сторон, n – показатель преломления среды в зазоре, рис. 3.3. В случае воздушного зазора ($n=1$) потери составляют 0,35 дБ. Френелевские потери можно уменьшить, подбирая наполнитель между соединителями, близкий по показателю преломления к волокну, или делая зазор много меньше длины волны.

Обычно суммарные потери в соединителе составляют до 0,3–0,4 дБ для одномодового и многомодового волокон. При этом, естественно, более жесткие требования предъявляются к качеству одномодового соединителя.

Обратное отражение и контакты типа PC, Super PC, Ultra PC, APC

Рассеяние не только ведет к ослаблению проходящего сигнала, но и увеличивает обратный световой поток. Обратное отражение, как правило, начинает сказываться в оптических линиях широкополосной цифровой передачи, широкополосной аналоговой передачи, или в магистральных линиях с большим числом разъемных сопряжений. Для построения таких линий, в основном, используется одномодовое волокно. Сильное обратное отражение от стыков соединителей может взаимодействовать с активной средой лазерного передатчика и, в конечном итоге, приводить к ненужным дополнительным световым сигналам. В абонентских широкоэмиттерных сетях кабельного телевидения, использующих широкополосные (до 1 ГГц) аналоговые оптические передатчики, такая обратная связь приводит к паразитной интерференции передаваемых сигналов, в результате чего, например, ухудшается качество видеоизображения. При цифровой передаче обратное рассеяние менее критично, однако суммарный эффект обратного рассеяния на нескольких стыках соединителей может быть причиной потери битовой информации на приемном устройстве.

Обратное отражение является вторым по пагубности фактором после вносимых потерь. Коэффициент обратного отражения R определяется как $R = P_r/P_m$, а *потери на обратном отражении* или просто *обратные потери* b – определяются как $b = 10 \lg R = 10 \lg P_r/P_m$ [дБ], где P_r – интенсивность отраженного излучения. Знак минус (в отличие от соотношения для вносимых потерь) здесь намеренно отсутствует, что ведет к отрицательным значениям для обратных потерь. Лучшими характеристиками обладает соединение с более низкими вносимыми потерями (ближе к 0 дБ) и более низкими (более отрицательными) обратными потерями.

Основным фактором, вносящим вклад в обратное отражение, является френелевское отражение вследствие зазора S (обычно воздушного) между торцами волокон. Наиболее общее выражение для коэффициента отражения имеет вид

$$R_F = \frac{(n_1^2 - n^2)^2 \sin^2(2\pi nS/\lambda)}{4n_1^2 n^2 + (n_1^2 - n^2)^2 \sin^2(2\pi nS/\lambda)}, \quad (3-5)$$

где n_1 – показатель преломления волокна (одинаковый для обеих сторон), n – показатель преломления среды в зазоре (рис. 3.3). Обычно пренебрегают разницей в показателях преломления между волокнами при разъёмном соединении. Заметим, что $R_F + D_F = 1$, что соответствует закону сохранения энергии. Непараллельность торцов приводит к разным значениям зазора S для разных участков сердцевин. В этом случае, происходит усреднение по осцилляциям синуса, а обратные потери определяются как $b_F = -10 \lg \bar{R}_F = -10 \lg \left((n_1 - n)^2 / (n_1^2 + n^2) \right)$ [дБ]. При $n_1 = 1,5$ и $n = 1,0$ они равны -11 дБ. Коэффициент отражения может обращаться в нуль при ненулевых значениях зазора S , когда аргумент синуса кратен π . Однако практически это невозможно достичь. Более того, это выполнялось бы только для одной длины волны или ее узкой окрестности. Поэтому, только путем уменьшения величины зазора можно достичь более низких значений коэффициента отражения и, соответственно, обратных потерь. В табл. 3.1 приведены значения обратных потерь для разных отношений зазора и длины волны.

Таблица 3.1. Зависимость френелевского отражения от величины зазора ($n_1=1,5$; $n=1,0$; рис. 3.3)

S/λ	Коэффициент передачи, D_F	Вносимые потери, a_F , дБ	Коэффициент отражения, R_F	Обратные потери, b_F , дБ
0,250	0,85207	0,69524	0,14793	-8,3
0,100	0,94341	0,25298	0,05659	-12,5
0,050	0,98369	0,07141	0,01631	-17,9
0,020	0,99728	0,01183	0,00272	-25,7
0,010	0,99932	0,00297	0,00068	-31,6
0,005	0,99983	0,00074	0,00017	-37,7
0,002	0,99997	0,00012	0,00003	-45,6
0,001	0,99999	0,00003	0,00001	-51,6

При малых значениях S/λ ($S/\lambda < 0,1$) вклад френелевского отражения во вносимые потери пренебрежимо мал, тем не менее именно френелевское отражение является главным фактором обратных потерь.

Значительное уменьшение зазора достигается при сферической поверхности торцов, что позволяет обеспечить физический контакт (physical contact, PC) волокон [5]. Почему не использовать плоскую поверхность торцов? Потому, что на практике создание очень близких к нормали поверхностей затруднительно. Более вероятно, что торцы обоих наконечников будут иметь небольшие отклонения, но вполне достаточные, чтобы образовался зазор между сердцевинами волокон, рис. 3.4 а. Так, отклонение на угол $\varphi = 0,05^\circ$ между плоскостями на-

конечников приводит к зазору около 1 мкм (диаметр наконечника 2,5 мм). При сферической поверхности торцов соприкосновение всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон, рис. 4 б.

Существуют три градации физического контакта, отличающиеся уровнем потерь на обратном отражении: PC < -30 дБ; SuperPC < -40 дБ; UltraPC < -50 дБ. Из табл. 3 1 можно оценить, какие зазоры соответствуют этим градациям.

Радиус кривизны R при PC-соединении может находиться в диапазоне от 15 до 25 мм. Причиной различных значений является не технология процесса полировки, а разные требования, предъявляемые к разным конструкциям и элементам соединителей (например, к керамическим и металлическим наконечникам).

Обратное рассеяние может быть еще больше уменьшено при использовании углового (наклонного) физического контакта (angled PC, APC), рис. 3.4 в. При наклонном торце даже в том случае, когда нет физического контакта, сильный отраженный сигнал не распространяется обратно по сердцевине волокна, а попадает в оболочку. Угол наклона θ наконечника определяется как угол между осью световодной сердцевины и нормалью к плоскости, касательной в точке поверхности, где находится сердцевина, рис. 3.4 в. Потери на обратном отражении для APC обычно меньше -60 дБ, а типичные значения могут быть -75 дБ.

Радиус кривизны R для APC может находиться в диапазоне от 5 до 15 мм. Уменьшение радиусов кривизны по сравнению с PC объясняется тем, что меньший радиус кривизны обеспечивает большую вариацию угла $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ между наконечниками при сохранении физического контакта. При использовании ступенчатого одномодового волокна угол наклона θ составляет 8° , что приводит к потерям на обратное отражение в районе -70 дБ. Что касается волокна со смещенной дисперсией, то оно имеет большие числовые апертуры по сравнению со ступенчатым. Поэтому при использовании одномодового волокна со смещенной дисперсией для того, чтобы обеспечить такие же низкие потери на обратном отражении, угол наклона делают больше – стандартизировано значение 12° [6].

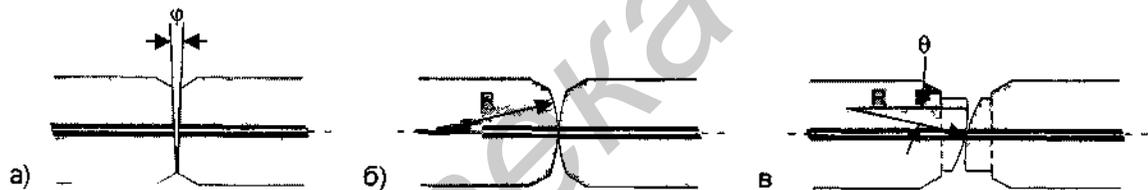


Рис. 3.4. Типы контактов соединителей: а) плоская поверхность; б) сферическая поверхность – физический контакт (PC); в) наклонная сферическая поверхность – угловой физический контакт (APC)

Из-за более сложной процедуры изготовления стандарт APC не получил еще достаточного распространения. Однако в широкополосных абонентских сетях HFC, а также в ультраскоростных оптических магистралях (до 1 Гбит/с и более) рекомендуется использование стандарта APC.

К росту обратного отражения ведет большое количество микротрещин на торцевой поверхности волокна. Уменьшать их количество можно, выбирая оптимальную технологию полировки поверхности наконечника.

Надежность, механические, климатические и другие воздействия

Количество переключений. Обычно соединители рассчитаны на 500-1000 переключений. За это время увеличение вносимых потерь не должно превысить 0,2 дБ. Этого количества подключений при обычной эксплуатации более, чем достаточно. Разъемное соединение считается наиболее слабым звеном в кабельной системе. Сильное напряжение на микроскопическую поверхность, идущий к соединителю, или резкие воздействия (на кабель, на соединитель) могут привести к ухудшению технических характеристик соединения, или повредить его. Обычно места крепления переходных розеток делаются под навесом, или в нише. Аккуратная эксплуатация мест кроссирования оптических кабелей увеличивает срок службы соединителей и всей кабельной системы в целом.

Большинство соединителей рассчитано на эксплуатацию внутри помещений. Поддерживать чистоту для оптических соединителей более важно, чем для электрических. Загрязнение поверхности контакта не только влияет на вносимые потери, но и сильно сказывается на обратном отражении, так как оно препятствует физическому контакту. В элементы конструкций современных кроссовых панелей закладывается возможность легкого доступа к любому соединителю или к переходной розетке с целью проведения чистки. Оптические шнуры и переходные розетки, если нет подключения, закрываются специальными пылевлагозащитными колпачками. Не следует их снимать до момента использования.

Стандарты соединителей

Номенклатура стандартных соединителей достаточна велика: Biconic, D4, D-hole FC, FC, SC, MIC (FDDI), ESCON, SMA, ST, Лист-Х и другие. Наиболее широкое распространение получили соединители SC, ST и FC. Общие же тенденции говорят о том, что в будущем станет преобладать соединитель SC (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Стандарты оптических соединителей*

Страна	Старые стандарты (остающиеся в использовании)	Новые стандарты (направления развития)
Австрия	FC/PC (IEC 874-7)	FC/PC (IEC 874-7)
Англия	FC/PC (IEC 874-7)	FC/PC (IEC 874-7)
Бельгия	Optaball (CF-03, IEC 874-3)	EC (CF-08, IEC 874-13)
Германия	DIN47256 (LSA, IEC 874-6)	SC-APC (IEC 874-14) (EC)
Голландия	OCCU-PC (IEC 874-11)	SC/PC (IEC 874-14)
Дания	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)
Ирландия	FC/PC (IEC 874-7)	FC/PC (IEC 874-7)
Испания	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC, SC-APC (IEC 874-14)
Италия	Biconic (BAM, IEC 874-5), FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC, SC-APC (IEC 874-14)
Люксембург	DIN47256 (LSA, IEC 874-6)	DIN47256 (LSA, IEC 874-6)
Норвегия	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)
Россия	FC/PC (IEC 874-7)	FC/PC (IEC 874-7)
США	Biconic (BAM, IEC 874-5), FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)
Финляндия	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)
Франция	Optaball (CF-03, IEC 874-3)	EC (CF-08, IEC 874-13)
Швейцария	FC/PC (IEC 874-7)	FC/PC (IEC 874-7)
Швеция	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)
Япония	FC/PC (IEC 874-7)	SC/PC (IEC 874-14)

* Сведения предоставлены фирмой Molex

SC

Соединитель SC, дизайн которого принадлежит японской фирме NTT, считается самым перспективным, и применяется во всех отраслях, связанных с ВОЛС. Прямоугольная форма внешней конструкции с малыми размерами обеспечивают высокую компактность соединителя SC, рис. 3.5 а. Конструкция – защелка с фиксатором (push-pull) – обеспечивает простое подключение и большую концентрацию соединителей на оптических панелях. Соединитель SC выпускается как на многомодовое (mm), так и на одномодовое (sm) волокно. На рис. 3.5 в) показана переходная розетка SC. Есть также другая версия SC – полярный соединитель Duplex SC, и, соответственно, розетка Duplex SC, рис. 3.5 б, г. При соединении Duplex SC обеспечивается двунаправленный канал связи по паре оптических волокон. Международные организации ISO и TIA одобрили соединитель и розетку Duplex SC в качестве международного стандарта. Выпускается еще более компактный вариант розетки на 4 пары соединителей SC – розетка 4SC, рис. 3.5 д.

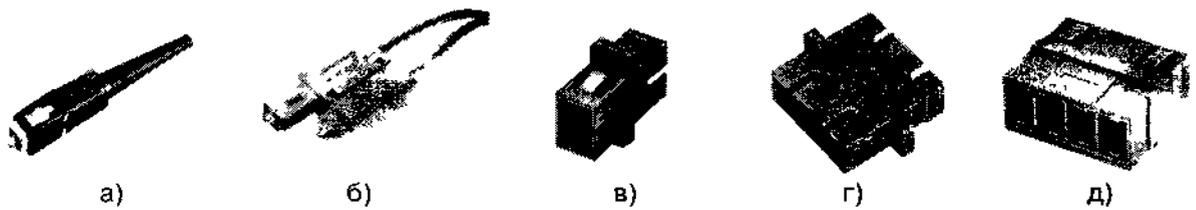


Рис. 3.5. Стандарт SC: а) соединитель SC; б) соединитель Duplex SC; в) розетка SC; г) розетка Duplex SC; д) розетка 4SC

Допустимые подключения (в расчете на одну сторону): розетка SC: один соединитель SC; розетка Duplex SC: один соединитель Duplex SC или два соединителя SC; розетка 4SC: четыре соединителя SC.

Основные характеристики стандарта SC приведены в табл. 3.3.

ST

Соединитель ST (рис. 3.6 а, б) появился раньше, чем SC. Его основная область применения – сети передачи данных, в особенности локальные сети. Соединители ST выпускаются как на многомодовое, так и на одномодовое волокно. Наибольшую популярность получил стандарт ST mm (Ethernet). Он стандартизован для физического уровня Ethernet с интерфейсом на многомодовое волокно (10Base-FL). Соединители ST имеют круглое поперечное сечение, с подпружиненным наконечником и байонетным типом фиксации с ключом. Основные характеристики стандарта ST приведены в табл. 3.3.

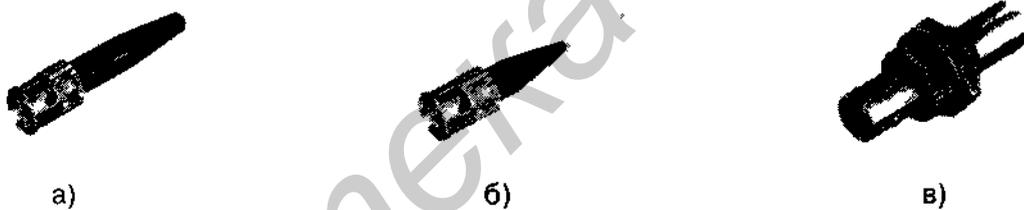


Рис. 3.6. Стандарт ST: а) соединитель ST; б) соединитель ST (под волокно во вторичном буфере); в) розетка ST

FC

Резьбовой соединитель FC (рис. 3.7 а, б) был разработан в начале 80-х годов. Он имеет наконечник такого же диаметра, как SC и ST (2,5 мм). Преимущественно используется с одномодовым волокном. Его оптические характеристики такие же, как у SC. К сожалению, закручивание гайки при подключении делает его менее удобным, чем SC, и не позволяет ему иметь дуплексный аналог. По этой же причине соединитель FC не такой компактный, как SC. Соответствующая розетка приведена на рис. 3.7 в. Основные характеристики стандарта FC приведены в табл. 3.3.

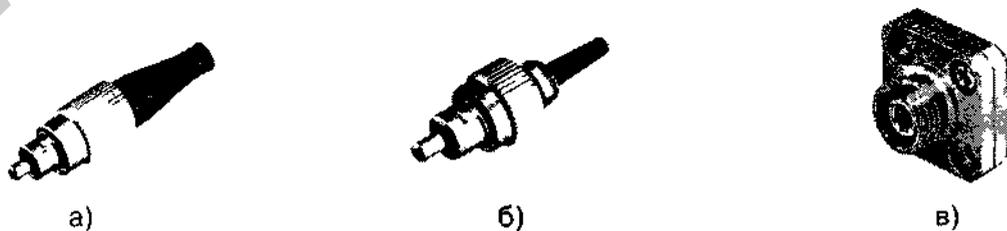
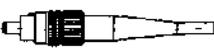
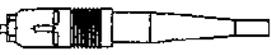


Рис. 3.7. Стандарт FC: а) соединитель FC; б) соединитель FC (под волокно во вторичном буфере); в) розетка FC

Таблица 3.3. Оптические соединители FC, SC, ST

Внешний вид соединителя						
Стандарт	FC	SC		ST		
Обозначение	FC/PC	SC MM	SC SM	ST MM	ST SM	
Физические характеристики						
Тип соединения (фиксация)	Резьба M8x0.75, ключ	Защелка с фиксатором (дизайн push-pull)		Байонетная фиксация с ключом		
Стыковка	Скругленный торец, физический контакт, плавающий наконечник, конструкция без утягивания кабеля			Скругленный торец, физический контакт, подпружиненный наконечник		
Совместимое волокно	SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм	
Оптические характеристики						
Вносимые потери	FLAT	< 1,0 дБ	-	-	-	-
	PC	< 0,5 дБ	< 0,25 дБ	< 0,5 дБ	< 0,7 дБ	< 1,0 дБ
	SPC	< 0,5 дБ	< 0,25 дБ	< 0,5 дБ	-	< 0,7 дБ
	UPC	< 0,5 дБ	-	< 0,5 дБ	-	< 0,7 дБ
	APC	< 0,5 дБ	-	< 0,5 дБ	-	-
Обратные потери	FLAT	-	-	-	-	-
	PC	< -27 дБ	< -22 дБ	< -27 дБ	-	< -30 дБ
	SPC	< -40 дБ	< -36 дБ	< -40 дБ	-	< -40 дБ
	UPC	< -50 дБ	-	< -50 дБ	-	< -50 дБ
APC	< -60 дБ	-	< -60 дБ	-	-	
Применение						
ЛВС	-	+	+	+	+	
Системы связи	+	-	+	-	+	
Кабельное телевидение	+	-	+	-	-	

Сокращения: SMF – одномодовое волокно, MMF – многомодовое волокно, D – диаметр сердцевины SMF (8-10 мкм), FLAT – плоский торец, PC – сферический торец, SPC – сферический торец, UPC – сферический торец, APC – угловой сферический торец

MIC

Полярный дуплексный соединитель MIC (media interface connector) был разработан специально для локальной сети FDDI, рис. 3.8. Этот соединитель схож с соединителем Duplex SC. Ключ, являющийся неизменным атрибутом соединителя MIC, задает не только нужную полярность подключения, но и тип порта (A, B, Master, Slave). Более подробно этот соединитель рассмотрен в разделе, посвященном стандарту FDDI.

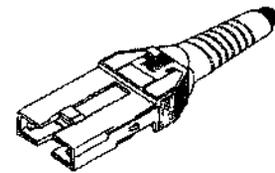


Рис. 3.8. Соединитель MIC (FDDI)

Оптические шнуры

Оптический шнур – это оптический миникабель, оконцованный с обеих сторон соединителями. Оптические шнуры бывают одномодовые, многомодовые (с одномодовым и многомо-

довым волокном, соответственно), одиночные (с одним волокном), двойные (с двумя волокнами). Они также различаются типом соединителей и могут поставляться разной длины под заказ. Пример обозначения оптического шнура: ST – Duplex SC MM 50/125 5м. Это двойной оптический шнур с многомодовым волокном 50/125 длиной 5м, оконцованный с одной стороны соединителем Duplex SC, с другой стороны – двумя соединителями ST.

Основные функция оптического шнура – обеспечение соединения: между разными активными сетевыми устройствами; между сетевым устройством и оптическим распределительным узлом; внутри оптического соединительного узла или кросса (внутренняя кросс-коммутация).

Примеры оптических шнуров приведены на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Примеры одиночных оптических шнуров: а) ST-ST; б) SC-ST

Розетка должна соответствовать типу соединителей. Выпускаются переходные розетки, обеспечивающие сочленение разнородных соединителей. Однако такие розетки получили меньшее распространение из-за того, что не составляет большого труда изготовление оптического шнура с разными типами соединителей.

Адаптеры быстрого оконцевания

Изготовление оптических шнуров, т.е. заделка оптического волокна в соединитель наряду с конструктором соединителя и миникабелем требует приемлемых лабораторных условий для монтажа и специального оборудования, в частности: полировального оборудования (оборудования для ручной полировки и/или специализированной полировальной машины), печи для обеспечения более быстрого затвердевания эпоксидного клея. Иногда для выполнения быстрого соединения проще использовать адаптер быстрого оконцевания обнаженного волокна. Такая заделка волокна является временной процедурой и применяется к волокнам в стандартном 3 мм миникабеле и 900 мкм буфере (tight-buffer). Адаптеры быстрого оконцевания используют стандартные соединители ST, FC, SC и обеспечивают потери при соединении с другими стандартными соединителями менее 1 дБ при одномодовых и многомодовых соединениях [7].

Механический сплайс (МС)

При разрыве волокон ВОК, например в полевых условиях, можно восстановить повреждения, не прибегая к сварке волокон. МС – это прецизионное, простое в использовании, недорогое устройство для быстрой стыковки обнаженных многомодовых и одномодовых волокон в покрытие с диаметром 250 мкм-1 мм посредством специальных механических зажимов. МС предназначен для многократного (организация временных соединений) или однократного (организация постоянного соединения) использования. Стекланный капилляр, заполненный иммерсионным гелем, обеспечивает вносимые потери < 0,2 дБ и обратные потери < -50 дБ, [7, 8]. По надежности и по вносимым потерям механический сплайс уступает сварному соединению.

Производители и поставщики

Из-за обилия поставщиков, разнообразия типов, привлекательной цены, характеристик, говорящих об исключительно низких потерях, на рынке высококачественных волоконно-оптических компонентов пользователи стоят перед задачей выбора соединителя или оптического шнура с лучшими параметрами, что в конечном итоге влияет на работоспособность оптической системы, отдельных устройств, а также сети в целом.

Несмотря на многочисленные оптические компоненты, применяемые в сетях, оптические соединители не стоят отдельной единицей от остальных, хорошо определенных сетевых элементов. Соединители сопрягаются с другими соединителями и подвергаются многократ-

ным отключениям и подключениям в процессе эксплуатации сети. Основное, что они должны делать – это обеспечивать хорошее и надежное соединение. Поэтому рабочие характеристики соединителей зависят как от составляющих деталей (конструкторов) соединителей, производимых, как правило, разными фирмами в разное время и из различных материалов, так и собственно от сборки оптических шнуров. Следовательно, для того, чтобы гарантировать нормальные эксплуатационные характеристики, необходимо на всех этапах (от производства компонентной базы до производства оконцованного соединителями оптического миникабеля) соблюдать технологию производства и осуществлять технологический контроль качества. При производстве оптического шнура следует строго соблюдать технологию шлифовки торцов (при этом допускается как машинная, так и ручная шлифовка, что включает оптимальный выбор абразивных поверхностей, временных режимов). Только если строго выполнены все производственные нормативы, можно ожидать нормальную работу соединителей. Перед поставкой оптического шнура осуществляется его выходной контроль с замером двух основных характеристик: вносимых и обратных потерь. Если показатели не удовлетворительны, то шнур отправляется на доработку.

Наиболее крупные мировые производители компонентной базы: Seiko Instruments, 3M, AMP, Amphenol, Molex, ADC Telecommunications. Крупным производителем оптических соединителей (конструкторов) в России является фирма "Перспективные Технологии". Следует сказать, что лидерство по производству одной из самых прецизионных деталей – оптического наконечника – принадлежит фирме Seiko Instruments (90% от всего мирового производства). Основными поставщиками оптических шнуров в России являются фирмы "Вимком-Оптик", "Перспективные Технологии", а также "Телеком Комплект Сервис". В этих фирмах существуют специальные лаборатории по сборке оптических шнуров. Доступность комплектующих и инструмента приводит к тому, что многие потребители оптических шнуров имеют собственную сборку (РОТЕК, ЭЛОКОМ).

3.2. Сварное соединение волокон

Сварка (fusion splicing) оптических волокон основана на их точном центрировании, после чего волокна свариваются друг с другом при помощи дугового разряда между электродами. Центрирование волокон представляет из себя либо автоматическое центрирование, либо центрирование в V-образном пазу.

Наиболее распространенный метод автоматического центрирования основан на так называемой системе PAS, когда место срачивания волокон освещается сбоку при помощи зеркал с двух сторон. При этом на экране, находящемся на противоположной стороне от места срачивания камеры, появляется изображение, определяемое профилем преломления оптического волокна, по которому прибор может установить положение сердцевинки волокна.

Более простой в использовании метод центрирования в V-образном пазу (V-groove) требует высокого качества геометрии волокна для обеспечения приемлемых характеристик сварного соединения, рис. 3.10.

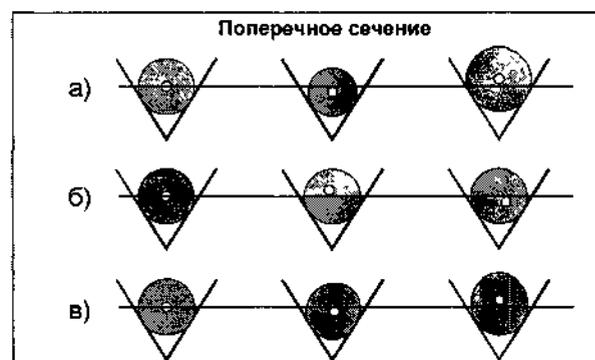
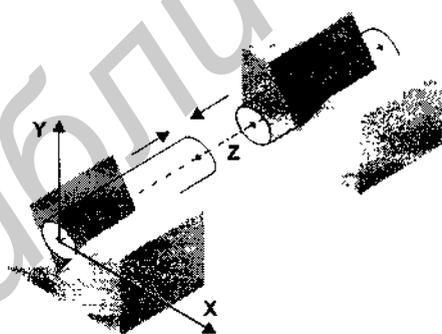


Рис. 3.10. Влияние геометрии волокна на качество сварки методом V-groove:
а) при разбросе значений диаметров оболочки волокна;
б) при отклонении concentричности сердцевина/оболочка от нормы;
в) при неоднородностях оболочки

Три геометрические характеристики волокна влияют на качество сварки методом V-groove:

- разброс значений диаметров оболочки волокна (cladding diameter distribution);
- concentricность сердцевина/оболочка (core/clad concentricity);
- неоднородности оболочки волокна (fiber curl) – утолщения или полости.

Приемлемым для метода V-groove является значение диаметра оболочки $125,0 \pm 1,0$ мкм, хотя это и более строгое требование, чем установленное Bellcore TR-20 в 1994 году.

Такое же отклонение в 1,0 мкм допустимо для concentricности сердцевина/оболочка, хотя и обсуждается вопрос уменьшить это значение до 0,8 мкм [10].

Неоднородность оболочки обычно проявляется реже и только на определенных участках волокна. Влияние этого фактора меньше, чем двух предыдущих, для волокон ведущих фирм-производителей.

Отметим, что влияние отклонения от идеальной геометрии волокна по трем перечисленным характеристикам практически не ухудшает качества сварки при использовании процедуры автоматического центрирования, поскольку центрирование контролируется положением сердцевины волокон.

После сварки оголенное волокно должно быть механически защищено, для чего чаще всего используют термоусаживающиеся защитные гильзы (также широко используется термин КДЗС – комплект для защиты стыка). Термоусадка этих гильз происходит в предназначенной для этой цели специальной печи, которая обычно является одним из узлов сварочного аппарата.

Сварка создает неразрывное соединение и поэтому обеспечивает наилучшие характеристики по вносимым и обратным потерям по сравнению с разъемным соединением или механическим сплайсом. Как правило, сварка используется в местах соединения участков оптических кабелей при их пролегании вне зданий и в местах оконцевания кабелей внутри зданий. При наружном соединении места сварки защищаются герметичными муфтами. Если же сварные соединения выполнены внутри здания, они помещаются в специальные сплайс боксы. Не всегда решение выбора сварки или разъемного соединения бывает простым. В неоднозначных ситуациях следует учитывать преимущества и недостатки каждого типа соединения (табл. 3.4) наряду с общими требованиями по эксплуатации волоконно-оптической кабельной системы в целом.

Таблица 3.4. Сравнение разъемного соединения и сварки

Преимущества разъемного соединения	Преимущества сварного соединения
Существует разрыв	Непрерывное соединение
Простое подключение после монтажа	Меньшие вносимые потери
Легкая реконфигурация	Меньшие обратные потери
Предусматривает стандартные типы соединителей	Легче достигается герметичность
Допускается заводская прединсталляция	Менее дорогое в расчете на одно соединение
	Более компактное в расчете на одно соединение

Может показаться странным наличие в качестве преимуществ двух первых диаметрально противоположенных пунктов у разъемного и сварного соединения. Однако каждая из характеристик положительно проявляется в определенных приложениях. Например, лучшей защитой для проходного соединения кабелей, проложенных в грунте, будет сварка. В то же время, при построении локальной сети разъемное соединение для подключения сетевых узлов будет более гибким и даст возможность перемещать сетевое оборудование в пределах здания.

Преимущество малых вносимых потерь у сварного соединения особенно сильно проявляется при построении протяженных оптических магистралей с расстоянием между ретрансляторами в несколько десятков километров. На подобных участках может располагаться до нескольких десятков сегментов строительных длин одномодового ВОК.

Получение сварных соединений высокого качества упрощается благодаря постоянному совершенствованию сварочных аппаратов, процедур и практики сварки. Кроме этого, непрерывно улучшается контроль за геометрией в процессе производства волокна и его качество.

В результате на сегодняшний день характерные значения вносимых потерь находятся в диапазоне от 0,05 до 0,1 дБ как для одномодового, так и для многомодового волокна [9].

Одноволоконная дуговая сварка – один из наиболее распространенных методов сварки, предполагающий сварку одной пары волокон. Одноволоконная дуговая сварка допускает как использование метода автоматического центрирования, так метода V-groove.

Многоволоконная дуговая сварка – менее распространенный, хотя и стремительно набирающий силу метод создания неразрывного соединения, предполагающий одновременную сварку сразу нескольких пар волокон (от 4 до 12 пар). Сварочные аппараты, использующие многоволоконную сварку, предназначены для сращивания ленточных волокон и могут также использовать любой из методов центрирования волокна. Аппараты с автоматическим центрированием (автоматы) более дорогие, чем аппараты, использующие метод V-groove. Совершенствование качества производимого волокна способствует росту спроса на сварочные аппараты, использующие многоволоконную сварку с методом центрирования V-groove. Основная область применения таких аппаратов – сварка ленточных ВОК и ВОК с большим количеством волокон (36, 72, 144).

Количественные оценки качества сварки

Качество сварки определяется: вносимыми потерями и натяжным усилием.

Обратные потери при сварном соединении пренебрежимо малы (< -70 дБ), так как главный фактор обратных потерь, свойственный разъёмным соединениям – воздушный зазор – отсутствует. Вклад в обратные потери даёт френелевское рассеяние, связанное с разницей в показателях преломления волокон. Однако поставляемое одномодовое волокно имеет очень высокую стабильность показателя преломления $\Delta n/n < 0,001$. Кроме этого, скачок в показателях преломления сглаживается благодаря диффузии, протекающей во время сварки. *Вносимые потери*, как и потери при организации разрывного соединения, подразделяются на внутренние и внешние потери.

Внутренние потери. Для многомодового градиентного волокна внутренние, или волоконно-зависимые потери, определяются парным различием числовых апертур, эксцентриситетов, диаметров (концентричностей) и показателей преломления у сращиваемых волокон. Некоторые сварочные аппараты осуществляют выравнивание по осям сердцевин, и, таким образом, ослабляют фактор наличия разности эксцентриситетов. Но невозможно устранить потери из-за скачка диаметров и числовых апертур. Эти потери зависят от направления и естественно возникают, когда свет переходит из волокна с большим диаметром в волокно с меньшим или из волокна с большей апертурой в волокно с меньшей апертурой. Потери носят аддитивный характер в том смысле, что если, например, сращиваемые многомодовые волокна проявляют отклонения как в диаметрах, так и в числовых апертурах, то вклад во внутренние потери будет представлен суммой отдельных потерь из-за отклонения в диаметрах и отклонения в числовых апертурах. Теоретические оценки вклада во внутренние потери двух основных факторов (разницы диаметров и разницы апертур) приведены на рис. 3.11 а.

Для одномодового ступенчатого волокна доминирующим фактором внутренних потерь является различие в диаметрах модовых полей (MFD, mode field diameter). Внутренние потери (усреднённые по обоим направлениям), в зависимости от отношения MFD волокон, показаны на рис. 3.11 б.

Ведущие фирмы-производители оптического волокна выпускают одномодовое волокно с достаточно высокой стабильностью значений MFD. Например, в наихудшем случае волоконно-зависимые потери при сварке волокон с MFD $9,3 \pm 0,5$ мкм составляют 0,04 дБ.

Внешние потери возникают вследствие несовершенства самого процесса сварки. Они включают осевое, угловое отклонение, загрязнение и деформацию сердцевин волокон. Влияние этих факторов может быть уменьшено благодаря индивидуальному мастерству и опыту специалиста, выполняющего сварку, или благодаря качеству автоматического сближения и выравнивания волокон и циклам дуговой сварки при использовании современных сварочных аппаратов-автоматов.

Натяжное усилие, необходимое для разъединения сваренных волокон, также характеризует качество сварки. Чем выше значение разрывного усилия, тем выше качество сварки. Естественно, нет смысла разрывать готовое соединение, но можно делать контрольные измерения, тем самым определяя, насколько качественно может быть выполнена сварка для данных типов волокон. Причиной разрыва является повышенная концентрация и большие размеры микротрещин на поверхности в окрестности места сварки.

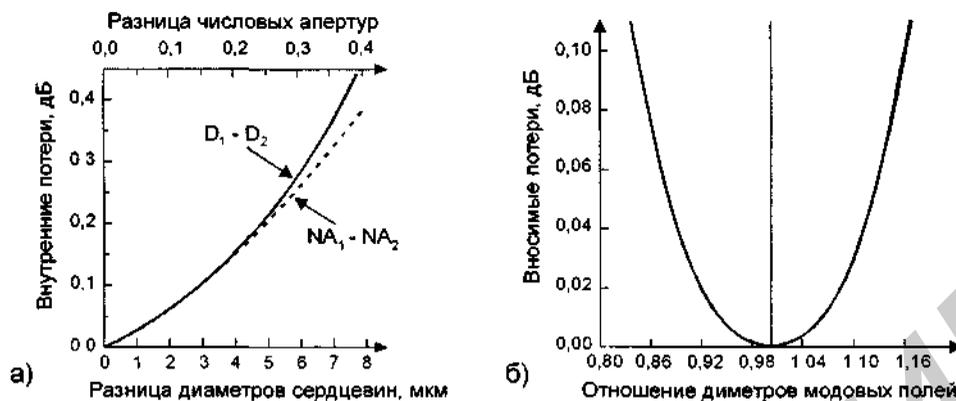


Рис. 3.11. Внутренние потери при сварке [9]: а) из-за разности диаметров и числовых апертур волокон; б) обусловленные различием в диаметрах модовых полей

Затраты, связанные с различными технологиями сварки, хотя и варьируются в зависимости от метода сварки, опыта специалистов и других факторов, считаются относительно высокими. Но несмотря на это, сварка остается самой распространенной и самой надежной технологией сведения волокон: при одновременном монтаже сразу нескольких волокон, при одиночной сварке с использованием как активной, так и пассивной систем осевого выравнивания.

Наиболее распространены автоматизированные сварочные аппараты для одноволоконной сварки фирм Fujikura – FSM-30S и Sumitomo Electric Industries – Type-35SE.

3.3. Оптические разветвители

Одним из наиболее важных устройств, относящихся к пассивным компонентам ВОЛС, является оптический разветвитель (coupler, другое название splitter). Разветвители широко используются при построении распределенных волоконно-коаксиальных сетей кабельного телевидения, а также в межгосударственных проектах полностью оптических сетей (all-optical networks). В обоих случаях сети без использования разветвителей были бы значительно дороже.

Оптический разветвитель представляет собой в общем случае многополюсное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных оптических полюсов, распределяется между его остальными оптическими полюсами [1].

Различают направленные и двунаправленные разветвители, а также разветвители, чувствительные к длине волны и нечувствительные. В двунаправленном разветвителе каждый полюс может работать или на прием сигнала, или на передачу, или осуществлять прием и передачу одновременно, так что группы приемных и передающих полюсов могут меняться местами в функциональном смысле.

Основные категории оптических разветвителей следующие: древовидный разветвитель; звездообразный разветвитель; ответвитель.

Древовидный разветвитель (tree coupler)

Древовидный разветвитель осуществляет расщепление одного входного оптического сигнала на несколько выходных, или выполняет обратную функцию – объединение нескольких сигналов в один выходной (рис. 3.12 а). Обычно древовидные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами. Конфигурация полюсов обозначается как $n \times m$, где n – число входных полюсов (для древовидного разветвителя $n = 1$), а m – число выходных полюсов, когда устройство работает в режиме расщепления. В поставляемых в настоящее время моделях количество выходных портов может находиться в преде-

лах от 2 до 32. Большинство древовидных разветвителей полностью двунаправленные. Поэтому разветвитель может выполнять функцию объединения сигналов. Передаточные параметры для разных выходных полюсов разветвителя стремятся делать более близкими друг другу.

Звездообразный разветвитель (star coupler)

Звездообразный разветвитель обычно имеет одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал приходит на один из n входных полюсов и в равной степени распределяется между n выходными полюсами. Более широкое распространение получили звездообразные разветвители 2×2 и 4×4 . Во избежании путаницы по входным и выходным полюсам, принято обозначать входные полюса латинскими буквами, а выходные полюса – цифрами, рис. 3.12 б. Звездообразные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами.

Ответвитель (tap)

Ответвитель – это обобщение древовидного разветвителя, когда выходная мощность распределяется необязательно в равной пропорции между выходными полюсами, рис.3.12 в. Конфигурации ответвителей бывают 1×2 , 1×3 , 1×4 , 1×5 , 1×6 , 1×8 , 1×16 , 1×32 . Некоторая доля (меньше 50%) выходной мощности идет на канал (каналы) ответвления, в то время как большая часть остается в магистральном канале. Выходные полюса нумеруются в порядке убывания мощности.

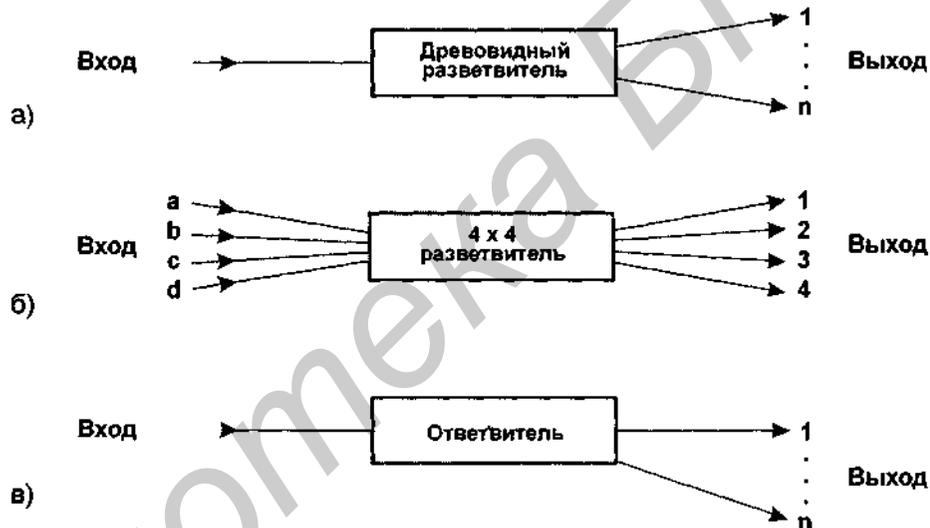


Рис. 3.12. Типы разветвителей: а) древовидный разветвитель; б) звездообразный разветвитель; в) ответвитель

Параметры, характеризующие разветвитель

Следуя рис. 3.12 б, введем следующие обозначения:

P_i – мощность оптического сигнала, приходящего на полюс i (например, на порт d);

$P_{i,j}$ – мощность, регистрируемая на выходном полюсе j при условии поступления сигнала на входной полюс i (например, на порт 1).

Следующие три набора параметров считаются основными при описании разветвителя.

Коэффициенты передачи или вносимые потери (insertion loss) определяют потери мощности сигнала, который приходит на один из входных полюсов и выходит с одного из выходных полюсов. Коэффициенты передачи определяются соотношением $a_{ins}(i, j) = -10 \lg(P_{i,j} / P_i)$ дБ.

Индексы i, j пробегает значения номеров входных и выходных полюсов соответственно, например $i = a, j = 1$.

Коэффициент направленности является мерой того, как хорошо разветвитель передает мощность в предназначенные выходные полюса. Он показывает интенсивность нежелательного обратного сигнала, возникающего на другом полюсе из входной группы полюсов, и определяется как $b_{dir}(i, j) = 10 \lg(P_{i,j} / P_1)$ дБ. Индексы i, j относятся к одной группе полюсов, например $i = 2, j = 3$, или $i = a, j = c$ (рис. 3.12 б). Для точного измерения коэффициента направленности, необходимо подавить влияние обратного рассеяния от соединителей в последующем канале. Для этой цели волокна всех полюсов за исключением i, j помещают в светопоглощающую иммерсионную жидкость с коэффициентом преломления, близким к оптическому волокну, рис. 3.13 а. Мощность, отраженная обратно, проходит через ответвитель. Ответвитель выбирается таким образом, чтобы подавляющая часть обратного сигнала направлялась в приемник. Перед этими измерениями ответвитель градуируется.

Потери на обратном рассеянии $b_{bs}(i) = 10 \lg(P_{ii} / P_1)$ дБ. Здесь P_{ii} – регистрируемая выходная мощность на полюсе i при условии подачи сигнала на этот же полюс. Этот коэффициент схож с коэффициентом обратных потерь в оптических соединителях. Процедура измерения потерь на обратном отражении во многом аналогична измерению коэффициента направленности – все полюса за исключением i -го помещаются в поглощающую жидкость (рис. 3.13 б).

Коэффициенты передачи принимают положительные значения и характеризуют эффективность передачи в прямом направлении. Коэффициенты направленности и потерь на обратном рассеянии принимают отрицательные значения и характеризуют нежелательные обратные сигналы. При изготовлении разветвителей стремятся достичь как можно меньших (более отрицательных) значений для коэффициентов направленности и потерь на обратном рассеянии.

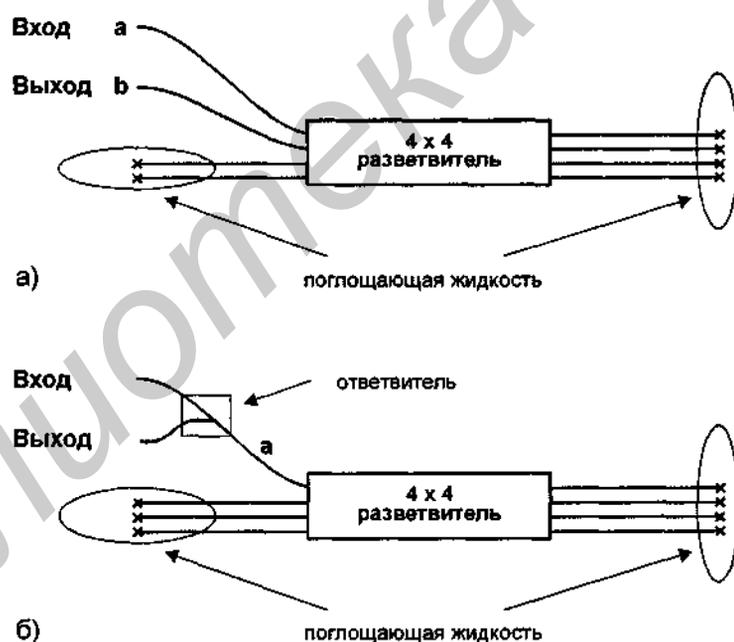


Рис. 3.13. Измерение: а) коэффициента направленности, б) потерь на обратном отражении

Наиболее общий способ представления данных о разветвителе основан на построении матрицы потерь. Для разветвителя $n \times n$ экспериментальным образом замеряются все приведенные выше коэффициенты, и строится матрица размером $2n \times 2n$. Пример матрицы разветвителя 4×4 (рис. 3.12 б) приведен в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Типовая матрица потерь $a_{i,j}$, дБ

Вход (i)	Выход (j)							
	a	b	c	d	1	2	3	4
a	-45,5	-48,5	-47,2	-49,7	6,8	6,9	6,7	6,7
b	-47,6	-46,1	-47,4	-49,7	6,9	6,8	6,8	6,6
c	-49,8	-47,6	-45,9	-46,9	6,6	6,8	6,8	6,7
d	-50,5	-48,2	-48,9	-46,2	6,6	6,7	6,8	6,7
1	6,7	6,8	6,9	6,7	-47,1	-47,3	-48,9	-46,6
2	6,7	6,8	6,8	6,7	-47,8	-46,5	-49,7	-48,3
3	6,7	6,9	6,8	6,7	-48,3	-46,5	-47,7	-48,5
4	6,7	6,6	6,9	6,8	-47,3	-46,7	-49,1	-47,9

На диагонали матрицы стоят коэффициенты потерь на обратном рассеянии, где в качестве канала входной последовательно выбираются полюса от а до 4. Из оставшихся числа в диапазоне 6,6-6,9 дБ соответствуют коэффициентам передачи, остальные – коэффициентам направленности.

Разветвитель с приведенной матрицей можно охарактеризовать следующим образом:

- максимальные вносимые потери на выходном полюсе 6,9 дБ;
- неоднородность (разность между максимальным (6,9 дБ) и минимальным (6,6 дБ) значением коэффициента передачи) 0,3 дБ;
- минимальное значение коэффициента направленности -48,5 дБ;
- минимальное значение потерь на обратном рассеянии -46,2 дБ.

Полные избыточные потери определяются как $a_{exc}(i) = -10 \lg \left[\frac{\sum_j P_{i,j}}{P_i} \right]$ дБ, где зна-

менатель дроби под логарифмом соответствует входному сигналу на входном полюсе i , а числитель суммарному полезному выходному сигналу. Этот параметр – общая характеристика работы разветвителя.

Рабочий диапазон длин волн (passband) – диапазон длин волн, в пределах которого определена работа разветвителя. Чем шире диапазон, тем меньше зависимость вносимых потерь разветвителя от длины волны. Разветвители, имеющие большой рабочий диапазон длин волн, называются *ахроматическими* (achromatic). Лазеры без охлаждения и светоизлучающие диоды требуют полосы пропускания ± 35 нм в окрестности несущей длины волны. Для поддержания такого диапазона оптический разветвитель должен быть ахроматическим.

Потери на разветвлении (splitting loss) – это потери, связанные с тем, что мощность естественным образом распределяется между выходными полюсами. Для идеального разветвителя (1хn) с n выходными полюсами, в предположении равенства взаимного равенства мощностей между ними всеми выходными портами, потери на разветвлении определяются соотношением $a_{SL} = -10 \lg(1/n)$. Это – минимальное значение, присущее идеальному разветвителю с симметричными выходными полюсами. Так, для разветвителя 4х4 потери $a_{SL} = 6,02$ дБ (сравните с таблицей).

Соотношение разветвления (splitting ratio) описывает, каким образом свет распределяется между выходными полюсами. Эта характеристика, свойственная оптическим ответвителям, может быть выражена как в виде набора коэффициентов передачи по выходным полюсам (частный случай матрицы потерь), так и в виде процентной пропорции мощностей по выходным полюсам, где за 100% принята суммарная выходная мощность.

В табл. 3.6 приведена номенклатура оптических ответвителей, рассчитанных на одномодовое волокно, производства ADC Telecommunications.

Таблица 3.6. Номенклатура оптических ответвителей под одномодовое волокно [11]

Код ответвителя	Тип ответвителя	Соотношение разветвления (%)	Коэффициенты передачи (дБ, max)	Коэффициенты передачи (дБ, типовое)
200	1x2	50/50	3,7/3,7	3,1/3,1
201	(3) 1x2	(50/50) x3	(3,7/3,7) x3	(3,1/3,1) x3
210	1x2	55/45	3,2/4,1	2,7/3,6
220	1x2	60/40	2,7/4,7	2,3/4,1
230	1x2	65/35	2,3/5,3	2,0/4,7
240	1x2	70/30	2,0/6,0	1,7/5,4
250	1x2	75/25	1,6/6,8	1,4/6,2
260	1x2	80/20	1,3/7,8	1,1/1,7
270	1x2	85/15	1,0/9,2	0,8/8,4
280	1x2	90/10	0,8/11,2	0,6/10,2
290	1x2	95/5	0,5/14,4	0,4/13,2
305	1x3	70/15/15	2,0/9,7/9,7	1,7/8,5/8,5
310	1x3	60/20/20	2,7/8,4/8,4	2,3/7,2/7,2
320	1x3	55/25/20	3,2/7,3/8,2	2,7/6,3/7,2
330	1x3	50/30/20	3,7/6,4/8,4	3,1/5,4/7,2
340	1x3	50/25/25	3,7/7,4/7,4	3,1/6,2/6,2
350	1x3	40/40/20	5,0/5,0/7,3	4,2/4,2/7,1
360	1x3	40/35/25	5,0/5,3/7,0	4,3/4,7/6,1
370	1x3	40/30/30	4,7/6,4/6,4	4,1/5,4/5,4
380	1x3	35/35/30	5,7/5,7/6,0	4,8/4,8/5,4
390	1x3	33/33/33	5,9/5,9/5,9	5,0/5,0/5,0
391	(2) 1x3	(33/33/33) x2	(5,9/5,9/5,9) x2	(5,0/5,0/5,0) x2
410	1x4	40/30/15/15	4,7/6,4/10,1/10,1	4,1/5,4/8,5/8,5
420	1x4	40/25/20/15	4,9/7,0/8,2/10	4,2/4,3/7,3/8,8
430	1x4	40/20/20/20	4,9/8,4/8,4/8,4	4,2/7,2/7,2/7,2
440	1x4	35/35/15/15	5,7/5,7/9,7/9,7	4,8/4,8/8,5/8,5
450	1x4	35/25/25/15	5,7/7,4/7,4/9,7	4,8/6,2/6,2/8,5
460	1x4	35/25/20/20	5,4/7,4/8,4/8,4	4,6/6,4/7,2/7,2
470	1x4	30/30/20/20	6,4/6,4/8,4/8,4	5,4/5,4/7,2/7,2
480	1x4	30/25/25/20	6,4/7,4/7,4/8,4	5,4/6,2/6,2/7,2
490	1x4	25/25/25/25	7,4/7,4/7,4/7,4	6,2/6,2/6,2/6,2
510	1x5	25/25/20/15/15	7,4/7,4/8,4/10,1/10,1	6,2/6,2/7,2/8,5/8,5
520	1x5	25/20/20/20/15	7,0/8,6/8,6/8,6/10	6,1/7,3/7,3/7,3/8,8
530	1x5	20/20/20/20/20	8,6/8,6/8,6/8,6/8,6	7,3/7,3/7,3/7,3/7,3
610	1x6	20/20/15/15/15/15	8,4/8,4/10,1/10,1/10,1/10,1	7,2/7,2/8,5/8,5/8,5/8,5
800	1x8	12,5/12,5/...12,5	11,3/11,3/...11,3	9,5/9,5/...9,5
116	1x16	6,25/6,25/...6,25	14,9/14,9/...14,9	12,7/12,7/...12,7
132	1x32	3,13/3,13/...3,13	18,5/18,5/...18,5	15,8/15,8/...15,8

3.4. Устройства волнового уплотнения WDM

Устройство волнового (спектрального) уплотнения WDM – WDM фильтр – выполняет функции мультиплексирования MUX (объединения) или демультиплексирования DEMUX (выделения или фильтрации) оптических сигналов разных длин волн – каналов – в одно волокно

из множества волокон или из одного волокна в несколько волокон. На передающей и приемной сторонах могут устанавливаться однотипные устройства, но работающие в режимах MUX и DEMUX соответственно. Сам факт существования устройств WDM основан на свойстве волокна пропускать множество каналов, которые распространяются по волокну, не взаимодействуя между собой, рис. 3.14.

Первые устройства WDM появились в начале 90-х годов. В основном это были широкозонные двухканальные системы с длинами волн 1310 нм и 1550 нм. В дальнейшем по мере все большего освоения окна 1550 нм появляются прецизионные узкозонные WDM устройства с мультиплексируемыми длинами волн, полностью лежащими в окне 1550 нм. Это позволяет строить протяженные магистрали с множеством каналов на волокно. Катализатором прогресса становятся оптические усилители EDFA. Практически вся рабочая область длин волн (pass-band), в которой усилитель EDFA имеет достаточно высокий коэффициент усиления и приемлемое отношение сигнал/шум (1530-1560 нм), отводится в распоряжение систем волнового уплотнения. Термин DWDM (dense wavelength division multiplexer) – плотное волновое мультиплексирование – используется по отношению к WDM устройствам с расстоянием между соседними каналами 1,6 нм и менее. Для построения многоканальных WDM систем наряду с пассивными WDM фильтрами также требуются узкополосные лазеры, стабильно выдерживающие нужную длину волны. Пока именно лазеры остаются наиболее дорогим элементом в таких системах, несколько сдерживая их развитие. В настоящее время поставляются системы с числом каналов 4, 8 и 16. Предполагается рост числа мультиплексных каналов до 32.



Рис. 3.14. Схема оптического сегмента, использующего передачу мультиплексного сигнала по волокну

Основные технические параметры WDM фильтров

Терминология одинаково применима ко всем WDM устройствам. Поэтому начнем обсуждение с простейшего двухканального мультиплексора. Наряду с функцией объединения (рис. 3.15 а) устройства WDM также могут выполнять обратную функцию (функцию демultipлексирования) – выделения сигналов разных длин волн из волокна, рис. 3.15 б. Большинство производимых WDM устройств совмещают режимы мультиплексирования и демultipлексирования в одном устройстве. Такие устройства могут также использоваться для мультиплексирования и демultipлексирования двунаправленных потоков, рис. 3.15 в.

В идеале сигнал λ_1 , поступающий на полюс 1 (рис. 3.15 а), должен полностью проходить в общий выходной полюс 3 (common). На практике, однако, доля сигнала на длине волны λ_1 ответвляется и проходит через полюс 2. Аналогично, применительно к рис. 3.15 б, идеальным было бы, если все 100% входной мощности сигнала λ_1 проходили через полюс 1 и наоборот. И здесь такой эффективности демultipлексирования для любого из существующих WDM устройств достичь невозможно. Для оценки этих паразитных явлений используют понятие переходные помехи.

Переходные помехи показывают, насколько эффективна работа WDM устройства. Они состоят из ближних и дальних переходных помех. *Ближние переходные помехи NEXT* (near-end crosstalk или directivity) аналогичны коэффициенту направленности и определяются как доля мощности, регистрируемая на длине волны λ_1 на полюсе 2, соответствующем длине волны λ_2 , при условии, что сигнал на длине волны λ_1 подается на полюс 1 (рис. 3.15 а). *Дальние переходные помехи FEXT* (far-end crosstalk, также называют isolation) являются мерой изоляции между выходными полюсами по сигналам разных длин волн. Так, если сигнал посту-

пает на длине волны λ_1 на полюс 3 (common), (рис. 3.15 б), то для него FEXT – это доля мощности, регистрируемая на длине волны λ_1 на полюсе 2, соответствующем длине волны λ_2 .

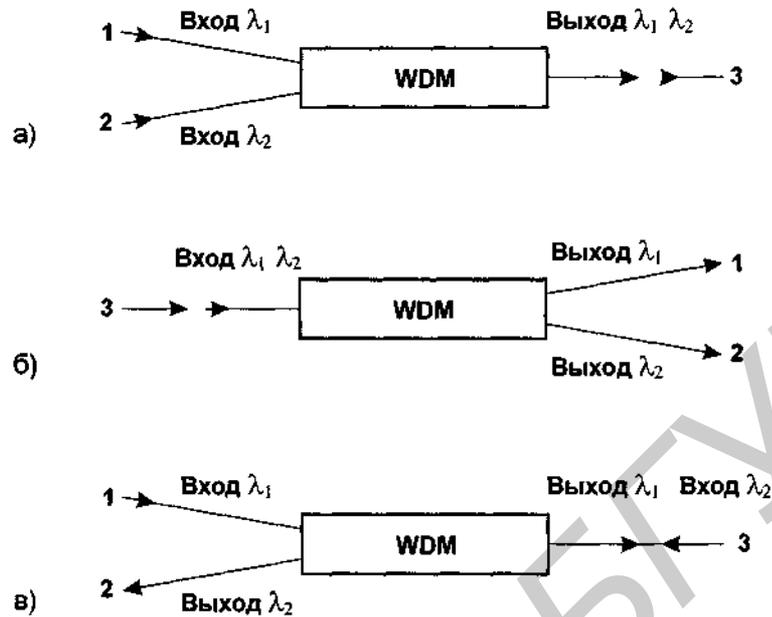


Рис. 3.15. Устройство WDM: а) мультиплексирование с уплотнением по длинам волн; б) демультиплексирование; в) мультиплексирование/демультиплексирование встречных потоков

В общем случае WDM модуль при работе в режиме мультиплексирования/ демультиплексирования может иметь n входных/выходных полюсов 1, 2, ..., n , которым соответствуют длины волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, и один общий выходной/входной полюс (com) соответственно, рис. 3 15 в. Будем обозначать такой модуль 1:n.

Введем следующие обозначения –
для мультиплексора:

$P_i(\lambda_k)$ – входной сигнал на длине волны λ_k , поступающий на полюс i ;

$P_{i,j}(\lambda_k)$ – выходной сигнал на длине волны λ_k , регистрируемый на входном полюсе j , при условии, что входной сигнал на длине волны λ_k поступает на полюс i ($i \neq j$);

$P_{ii}(\lambda_k)$ – обратное рассеяние сигнала на длине волны λ_k , поступающего на полюс i ;

$P_{i,com}(\lambda_k)$ – выходной сигнал на длине волны λ_k , регистрируемый на com-полюсе, при условии, что входной сигнал на длине волны λ_k поступает на полюс i ;

для демультиплексора:

$P_{com}(\lambda_k)$ – входной сигнал на длине волны λ_k , поступающий на com-полюс;

$P_{com,j}(\lambda_k)$ – выходной сигнал на длине волны λ_k , регистрируемый на выходном полюсе j , при условии, что входной сигнал на длине волны λ_k поступает на com-полюс ($j \neq k$);

$P_{com,com}(\lambda_k)$ – обратное рассеяние сигнала на длине волны λ_k , поступающего на com-полюс;

$P_{com,k}(\lambda_k)$ – выходной сигнал на длине волны λ_k , регистрируемый на выходном полюсе k (собственном), при условии, что входной сигнал на длине волны λ_k поступает на com-полюс.

Коэффициенты ближних b_{NEXT} , дальних b_{FEXT} переходных помех, а также коэффициенты обратного рассеяния на ближнем и дальнем концах b_{NE} и b_{FE} определяются соотношениями:

$$b_{\text{NEXT}}(i, j) = 10 \lg \frac{P_{i,j}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i \neq j = 1, \dots, n); \quad b_{\text{FEXT}}(i, j) = 10 \lg \frac{P_{\text{com},j}(\lambda_i)}{P_{\text{com}}(\lambda_i)}, \quad (j \neq i = 1, \dots, n);$$

$$b_{\text{NE}}(i) = 10 \lg \frac{P_{i,j}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n); \quad b_{\text{FE}}(i) = 10 \lg \frac{P_{\text{com},\text{com}}(\lambda_i)}{P_{\text{com}}(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n).$$

Коэффициенты передачи на ближнем a_{NE} и дальнем a_{FE} концах определяются соотношениями:

$$a_{\text{NE}}(i) = -10 \lg \frac{P_{i,\text{com}}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n); \quad a_{\text{FE}}(i) = -10 \lg \frac{P_{\text{com},j}(\lambda_i)}{P_{\text{com}}(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n).$$

В общем случае WDM модуль 1:n можно описать набором из n матриц переходных коэффициентов (по одной матрице на каждую длину волны), где каждая матрица имеет размерность $(n+1) \times (n+1)$.

Пример типичной матрицы WDM модуля 1:2 приведен в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Матрица потерь $a_{i,j}$ (дБ) WDM модуля 1:2

Вход	Выход $\lambda_1 = 1310$ нм			Выход $\lambda_2 = 1550$ нм		
	1	2	3 (com)	1	2	3 (com)
1	≤ -50	≤ -25	$\leq 1,5$	≤ -50	≤ -25	≤ -25
2	≤ -25	≤ -50	≤ -25	≤ -25	≤ -50	$\leq 1,5$
3 (com)	$\leq 1,5$	≤ -25	≤ -50	≤ -25	$\leq 1,5$	≤ -50

Широкозонные и узкозонные WDM фильтры

Широкозонные WDM фильтры предназначены для работы с двумя, максимум с тремя длинами волн при расстоянии между каналами более, чем 70 нм (1310, 1550, 1625 нм). Они наиболее часто применяются в системах кабельного телевидения 1310/1550 нм, или в цифровых телекоммуникационных системах передачи. Допускается также использование пары длин волн 1550/1625 нм при осуществлении дистанционного мониторинга ВОЛС на длине волны 1625 нм.

Внешний вид широкозонного WDM фильтра производства фирмы DiCon показан на рис. 3.16 а. Для справки приведем его основные технические параметры: длина волны 1310/1550 нм; режимы работы – мультиплексор (рис. 3.15 а), демультиплексор (рис. 3.15 б) или двунаправленная передача сигнала (рис. 3.15 с); ближние переходные помехи –60 дБ; дальние переходные помехи –40 дБ (по выходному порту 1) и –20 дБ (по выходному порту 2); вносимые потери не больше 1,0 и 0,7 дБ (в выходных портах 1 и 2 соответственно); обратные потери –55 дБ; используется стандартное одномодовое волокно фирмы Corning SMF-28; поставка возможна как без разъемов (стандартный миникабель \varnothing 3 мм, или волокно в буфере \varnothing 900 мкм), так и с разъемами в заказываемом сочетании.

Узкозонные WDM фильтры предназначены для мультиплексирования и демультиплексирования сигналов в многоканальных системах с расстоянием между каналами от минимального 1,6 нм (или еще меньше 0,8 нм) до 70 нм. Основные технические характеристики, за исключением рабочих длин волн, схожи с предыдущим типом. Основные области применения: волоконно-оптические системы с использованием оптических усилителей EDFA, мультиплексные системы "add/drop", полностью оптические сети.

Внешний вид трехполосного устройства и пятиполосного (четырёхканального) WDM устройств показан на рис. 3.16 б, в.

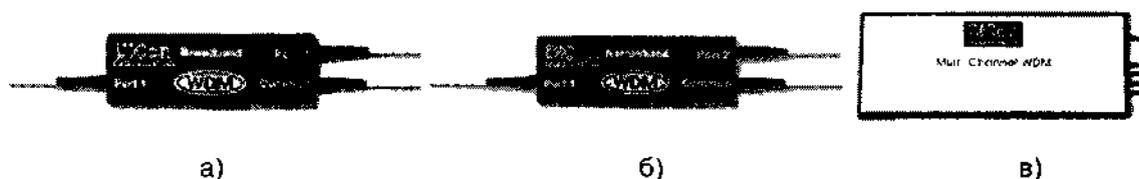


Рис. 3.16. Внешний вид WDM устройств производства фирмы DiCon [13]:
 а) широкозонный трехполосный 1310/1550/1625 WDM фильтр (1:2);
 б) узкозонный трехполосный WDM фильтр (1:2);
 в) 4-канальное устройство WDM (1:4)

Поставщики. Крупными поставщиками оптических разветвителей и WDM устройств являются: ADC [11], Amphenol [12], DiCon [13], FOCI [14], Lucent Technologies [15], Molex [16], Nortel [17], Oki Electric Industry [18] и др.

3.5. Оптические изоляторы

Оптический сигнал, распространяясь по волокну, отражается от различных неоднородностей, в особенности от мест сухого стыка, образуемых оптическими соединителями. В результате такого отражения часть энергии возвращается обратно. Если в качестве источников излучения используются лазерные диоды, то отраженный сигнал, попадая в резонатор лазера, способен индуцировано усиливаться, приводя к паразитному сигналу. Особенно это нежелательно, когда источник излучения генерирует цифровой широкополосный сигнал (>100 МГц), или аналоговый широкополосный сигнал (в смешанных волоконно-коаксиальных сетях кабельного телевидения до 1 ГГц). В сложных широкополосных сетях, когда имеется множество подключений коннекторов и другие оптические устройства (разветвители, WDM устройства, оптические усилители), такая обратная связь усиливается и приводит к росту уровня шума источника излучения. Наиболее кардинальный способ подавления обратного потока основан на использовании оптических изоляторов. Оптический изолятор обеспечивает пропускание света в одном направлении почти без потерь, а в другом (обратном) направлении с большим затуханием. Оптические изоляторы сегодня являются ключевым элементом многих лазерных систем, оптических усилителей, а также используются в качестве отдельного элемента оптической линии связи.

Вращение плоскости поляризации

В основе работы оптического изолятора лежит эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации света оптически неактивными веществами под действием продольного магнитного поля.

Угол поворота плоскости поляризации равен $\theta = VB_z d$, где V – постоянная Верде (Verdet) – удельное магнитное вращение, зависящая от природы вещества, температуры и длины волны света, B_z – продольная составляющая индукции магнитного поля, d – длина пути света в веществе – размер ячейки Фарадея. Направление вращения зависит только от природы вещества и направления магнитного поля. Знак вращения отсчитывается для наблюдателя, смотрящего вдоль магнитного поля. Магнитное вращение плоскости поляризации обусловлено возникновением асимметрии оптических свойств вещества под действием магнитного поля.

Зависимость вращения плоскости поляризации от длины волны света называется *вращательной дисперсией*. В первом приближении в области достаточно малых длин волн, удаленных от полос поглощения света веществом, угол вращения плоскости поляризации зависит от длины волны света λ по закону Био: $\theta \sim \lambda^{-2}$.

Принцип действия оптического изолятора

Оптический изолятор состоит из трех элементов: поляризатора 1 (входного поляризатора), ячейки Фарадея 2 и анализатора 3 (выходного поляризатора), рис. 3.17. Параметры ячейки Фарадея выбираются так, чтобы ось поляризации света, проходящего через нее, разворачивалась на 45° . Под таким же углом устанавливаются оси поляризаторов.

Входной полезный сигнал, проходя через поляризатор 1, оставляет свою вертикальную составляющую без изменения, устраняя горизонтальную составляющую, рис. 3.17 а. Далее вертикально поляризованный свет проходит через ячейку Фарадея 2, разворачивает плоскость поляризации на 45° и беспрепятственно проходит через анализатор 3.

При распространении света в обратном направлении (рис. 3.17 б) он также поляризуется в плоскости анализатора 3, затем, проходя через ячейку Фарадея 2, становится горизонтально поляризованным. Таким образом, оси поляризации света и поляризатора 1 составляют угол 90° , поэтому поляризатор 1 не пропускает обратное излучение.

Технические параметры

Основными требованиями, предъявляемыми к оптическому изолятору, являются малые вносимые потери в прямом направлении ($\sim 1-2$ дБ) и высокая изоляция (потери при распространении обратного сигнала) в обратном направлении (>30 дБ). Кроме того, должны обеспечиваться прозрачность во всем диапазоне рабочих длин волн, стабильность параметров при изменении температуры. В диапазоне длин волн $1,3-1,55$ мкм магнитооптическим материалом, используемым в ячейке Фарадея, является $Y_3Fe_5O_{12}$. На длине волны $0,85$ мкм используется парамагнитное стекло.

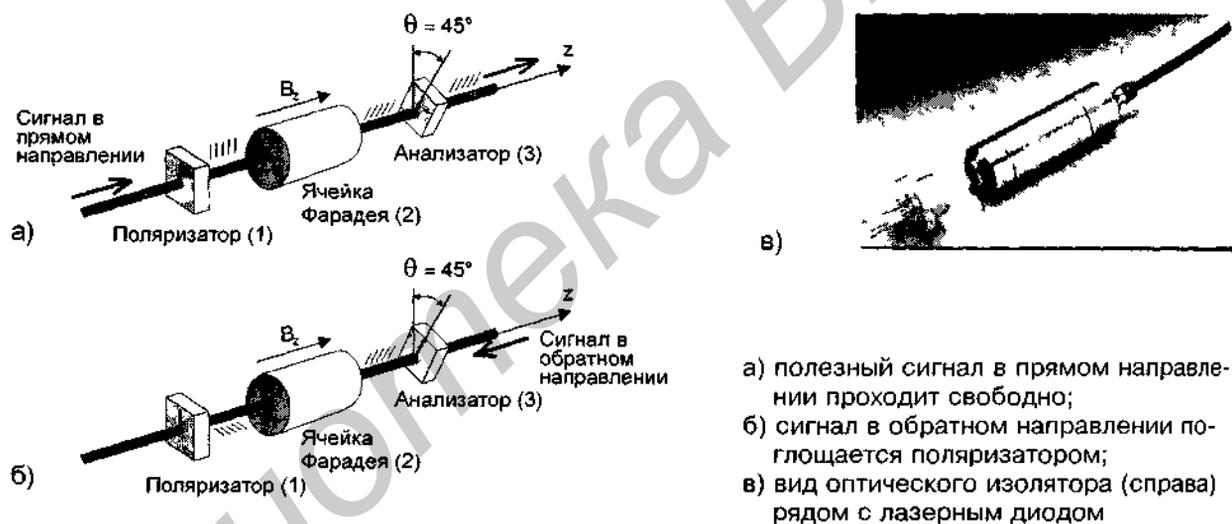


Рис. 3.17. Схема оптического изолятора:

Параметры оптических изоляторов, выпускаемых фирмами EOT (Electro-Optic Technology), OFR (Optical For Research, Inc.) приведены в табл. 3.8.

Оптические изоляторы часто интегрируются в лазерный передающий модуль. Высокая эффективность такого решения связана с тем, что выходной оптический сигнал от лазерного светодиода имеет эллиптическую поляризацию. Оптический изолятор устанавливается так, чтобы плоскость поляризации анализатора 1 совпала с плоскостью поляризации максимальной составляющей выходного сигнала от лазерного светодиода.

Оптические изоляторы также являются неотъемлемой частью оптических усилителей на примесном волокне. В этом случае устанавливается пара оптических изоляторов — один на входе, другой на выходе оптического усилителя. Поскольку оптические усилители, как правило, осуществляют усиление мультиплексного оптического сигнала, то необходимо, чтобы оптические изоляторы имели высокие характеристики во всем диапазоне длин волн, представ-

ленных в оптическом сигнале. Для этой цели используются специальные широкозонные оптические изоляторы.

Таблица 3.8. Технические параметры оптических изоляторов

Модель	Ю-G-1310 (1310 нм)	Ю-G-1550 (1550 нм)
Пиковая изоляция (на центральной длине волны)	≥ 36 дБ	$8 \div 16$ дБ
Полоса с изоляцией до 90% от пиковой	$1 \div 2\%$ от $\lambda = 1310$ нм	$1 \div 2\%$ от $\lambda = 1550$ нм
Вносимые потери	$0,7 \div 1,2$ дБ	$0,7 \div 1,2$ дБ
Обратные потери	> 55 дБ	> 55 дБ
Рабочая температура	$-20 \div +55^\circ\text{C}$	$-20 \div +55^\circ\text{C}$
Температура хранения	$-35 \div +80^\circ\text{C}$	$-35 \div +80^\circ\text{C}$
Относительная влажность	95%, $0^\circ\text{C} \div 40^\circ\text{C}$	95%, $0^\circ\text{C} \div 40^\circ\text{C}$

Поставщиками разнообразных оптических изоляторов являются фирмы: DiCon [13], FOCI [14], FiberPlex [19], Shinkosha [20].

3.6. Другие специальные пассивные компоненты ВОЛС

Аттенюаторы

Аттенюаторы используются с целью уменьшения мощности входного оптического сигнала. Такая необходимость может возникнуть как при передаче цифрового, так и аналогового сигнала. При цифровой передаче большой уровень способен привести к насыщению приемного оптоэлектронного модуля. При передаче аналогового сигнала чрезмерно высокий уровень приводит к нелинейным искажениям и ухудшению изображения. По принципу действия аттенюаторы бывают переменные и фиксированные.

Переменные аттенюаторы допускают регулировку величины затухания в пределах 0-20 дБ для многомодовых и одномодовых волокон с точностью установки величины затухания 0,5 дБ. Регулировка достигается путем изменения величины воздушного зазора.

Фиксированные аттенюаторы имеют установленное изготовителем значение затухания, величина которого может составлять 0, 5, 10, 15 или 20 дБ. Затухание может вноситься посредством воздушного зазора фиксированной величины, или посредством специального поглощающего фильтра, встроенного в аттенюатор [7, 26]. В последнем случае значительно уменьшается обратное отражение, поскольку фильтр имеет близкий к волокну показатель преломления, что сильно уменьшает обратное френелевское рассеяние.

Доступны разнообразные исполнения аттенюаторов: аттенюаторы-шнуры, аттенюаторы-розетки, аттенюаторы-FM розетки. *Аттенюаторы-шнуры* оконцовываются с обеих сторон стандартными соединителями (ST, SC или FC). Затухание в шнуре обеспечивается благодаря специальному волокну. *Аттенюаторы-розетки* бывают как переменные (с регулируемым воздушным зазором), так и фиксированные (с нерегулируемым воздушным зазором или фильтром). *Аттенюаторы-FM розетки*, рис. 3.18, устанавливаемые между стандартной переходной розеткой и оптическим соединителем, обычно выпускаются с фиксированным набором значений затухания 5, 10, 15 и 20 дБ (затухание обеспечивается либо нерегулируемым воздушным зазором, либо фильтром).

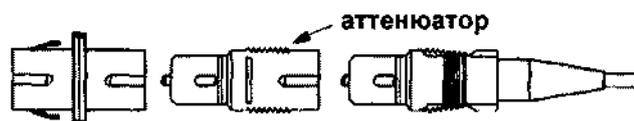


Рис. 3.18. Внешний вид аттенюатора-FM розетки стандарта SC

В широкополосных сетях кабельного телевидения при использовании гибридных волоконно-коаксиальных архитектур HFC обратное отражение, вносимое аттенуатором с воздушным зазором, может оказаться слишком большим. Значительно уменьшить обратное отражение можно, используя аттенуаторы со скошенным под углом 8° наконечником для подключения к соединителю FC/APC или SC/APC.

Оптические переключатели

Оптические переключатели осуществляют механическую, то есть без оптоэлектронного преобразования, коммутацию одного или нескольких оптических сигналов, переходящих из одних волокон в другие. При этом управление процессом переключения может быть ручное, например при помощи тумблера, или электрическое, при помощи электрического потенциала. Последний тип переключателей более распространен. Основная область применения – в составе оборудования для тестирования и мониторинга ВОЛС, а также в составе системы, обеспечивающей повышенную надежность (как, например, оптический обходной переключатель в технологии FDDI). Реализации отличаются функциональными возможностями: количеством входных и выходных волокон-полюсов и типом волокон (многомодовое или одномодовое), возможностью неблокирующей коммутации сигналов, а также техническими характеристиками, из которых наиболее важные: вносимые потери, обратное отражение, время срабатывания, влияние параметров окружающей среды, наработка на отказ. Разные инженерные технологии используются при коммутации, например, поворотные бипризмы, поворотные зеркала или подвижные волокна. Оптические переключатели являются изотропными устройствами – вносимые потери не зависят от направления распространения сигнала.

Различают несколько типов оптических переключателей:

- *Переключатель $1 \times N$* – имеет один входной полюс, сигнал из которого перенаправляется в один из N выходных, рис. 3.19 а;
- *Дуплексный переключатель $2 \times N$* – имеет два входных полюса, сигналы из которых могут перенаправляться в выходные полюсы с шагом 2, рис. 3.19 б;
- *Блокирующий переключатель $2 \times N$* – имеет два входных полюса, но только один сигнал из двух входных можно передать в выходной полюс – оставшийся сигнал не выходит наружу, рис. 3.19 в;
- *Неблокирующий переключатель $2 \times N$* – имеет два входных полюса, сигналы из которых могут перенаправляться в выходные полюсы с шагом 1, рис. 3.19 г.

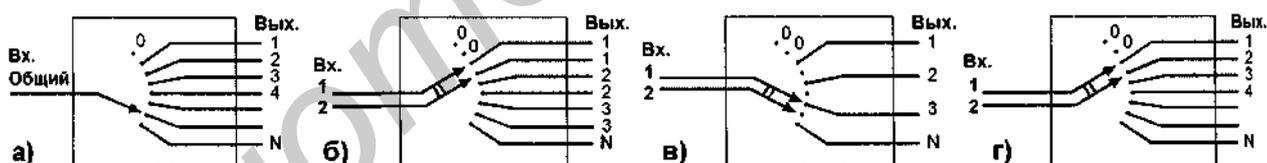


Рис. 3.19. Типы оптических переключателей

В технологии FDDI используется 8-полюсный (4 входных и 4 выходных) оптический обходной переключатель OBS (optical bypass switch), причем он может находиться либо в основном состоянии с коммутацией полюсов: $vx1-vых1$, $vx2-vых2$, $vx3-vых3$, $vx4-vых4$; либо в байпасовом состоянии с коммутацией полюсов: $vx1-vых2$, $vx2-vых1$, $vx3-vых4$, $vx4-vых3$.

Количество выходных полюсов в зависимости от модели может быть от двух до нескольких десятков. Из-за наличия механического элемента с ростом количества полюсов время срабатывания оптического переключателя, управляемого электрическим потенциалом, возрастает и может варьироваться в пределах от 25 мс до 500 мс.

Фирма DiCon Fiberoptics выпускает переключатели с количеством выходных полюсов до 100, с ручным или через стандартные физические электрические интерфейсы управлением (RS-232, RS-485). В табл. 3.9 приведены основные характеристики малопортовых переключателей этой фирмы.

Таблица 3.9. Характеристики оптических переключателей [13]

Характеристики	1x2 MM Switch	2x2 SM Switch	FDDI Dual Bypass Switch
Тип волокна	многомодовое	одномодовое	многомодовое
Вносимые потери, дБ	0,5; max 1,0	0,6; max 1,3	0,5; max 1,8
Обратное отражение, дБ	-	< -50	-
Время срабатывания, мс	< 25	< 50	< 25
Наработка на отказ, число циклов	> 10000000	> 10000000	> 10000000
Переходные помехи, дБ	< -80	< -80	< -80

Крупными поставщиками оптических переключателей являются: AMP, DiCon, Fibertron, JSD Fitel, Molex, NetOptics.

Соединительные герметичные муфты

При прокладке протяженной линии связи на один линейный участок между приемопередающим оборудованием может приходиться от единиц до нескольких десятков строительных длин ВОК. В местах сопряжения кусков оптических кабелей обычно производится сварка волокон с последующей надежной защитой мест сварки. Для этой цели используются соединительные муфты, основная задача которых – герметично на длительный срок закрыть область сваренных волокон. Муфты могут предназначаться для укладки в грунте, на дне рек, океанов, для подвески на опоры вдоль линии электропередач и т.д.

Наряду со специализированными поставляются и универсальные муфты, которые могут обеспечивать внешнюю защиту сразу нескольким широко используемым типам кабелей – для прокладки в грунт, в кабельную канализацию и для подвески на опорах. Примеры соединительных муфт показаны на рис. 3.20.



Рис. 3.20. Универсальные оптические соединительные муфты: а) муфта ХОК 10 (производитель NK Cables); б) проходная муфта MOM3 (поставщик "Перспективные Технологии")

Крупными поставщиками этой продукции являются PLP [21], Lucent Technologies, Siemens, NK Cables (Nokia) [22].

3.7. Оптические распределительные и коммутационные устройства

Когда ВОК наружной прокладки (линейный ВОК) заходит внутрь здания, его, как правило, не подключают непосредственно к приемопередающему оборудованию (оптическим трансиверам). Такое решение было бы ненадежным и негибким. Обычно предварительно выполняется терминирование волокон линейного ВОК.

Терминирование ВОК

Терминированием называется оконцевание волокон ВОК оптическими коннекторами и последующее подключение оконцованных волокон к переходным розеткам, закрепленным на оптической распределительной панели/коробке, для обеспечения дальнейшей связи с сетевым оборудованием через оптические соединительные шнуры.

Различают три способа терминирования ВОК: непосредственное терминирование; терминирование через сварку с заранее подготовленными, оконцованными с одной стороны волокнами (pig-tail-ами); терминирование через сварку с волокнами станционного ВОК.

Непосредственное терминирование подразумевает оконцевание волокон линейного ВОК коннекторами, которые затем подключаются к переходным розеткам, установленным на специальной оптической панели, рис. 3.21 а. Такое непосредственное оконцевание удобней производить в лабораторных или заводских условиях.

Терминирование через сварку с pig-tail-ами основано на сварке волокон линейного ВОК с волокнами заранее подготовленных так называемых pig-tail-ов. Pig-tail – это оптическое волокно в буферном покрытии длиной обычно до одного метра, оконцованное соединителем с одной стороны. Посредством соединителя волокно подключается к переходным розеткам оптической панели, рис. 3.21 б. В этом способе обычно сплайс пластины, в которые укладывают сваренные волокна, размещаются внутри той же панели, на которой устанавливаются переходные розетки.

Терминирование через сварку с волокнами станционного ВОК выполняется на оптических узлах с большой концентрацией волокон. В таких случаях под размещение сплайс пластин может быть выделено отдельное устройство (сплайс-панель, или сплайс-шкаф). Волокна линейного ВОК сваривают с волокнами притерминированного оптического кабеля для внутренней прокладки (станционного ВОК), рис. 3.21 в. Длина станционного ВОК может варьироваться от нескольких метров до нескольких километров. Одно из главных требований, которое предъявляется к станционному ВОК, – это отсутствие галогеносодержащих соединений в составе оболочки кабеля.

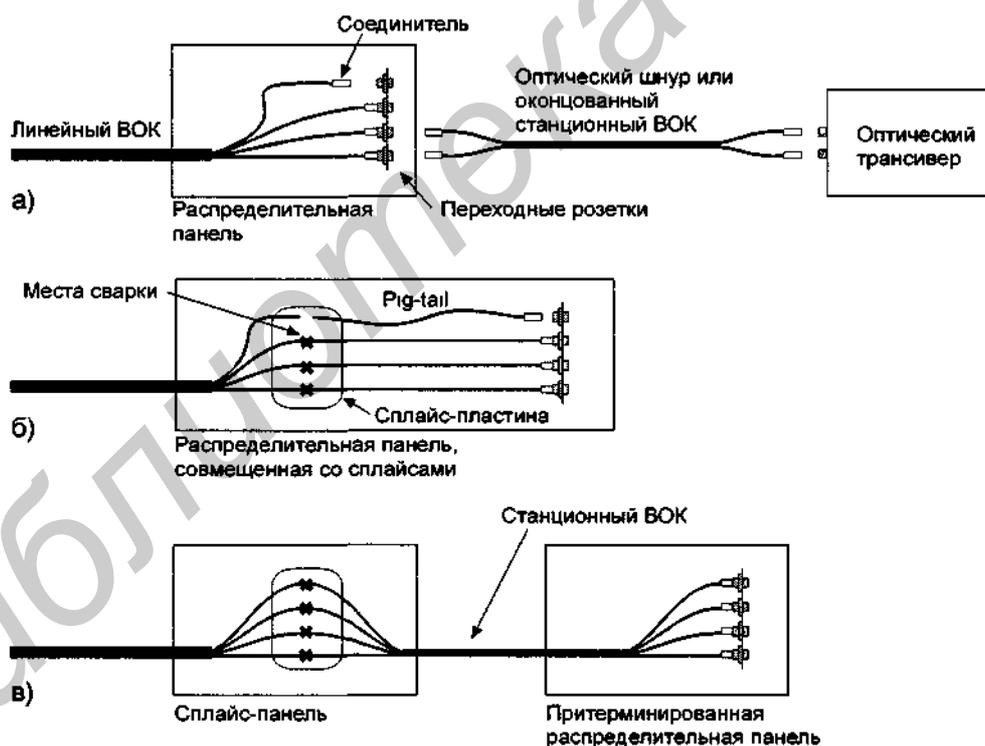


Рис. 3.21. Способы терминирования волокон: а) непосредственное терминирование; б) терминирование через сварку с pig-tail-ами; в) терминирование через сварку с волокнами станционного ВОК

При сварке волокон не требуется на месте монтажа столь большого набора инструментов и материалов, как при оконцевании. Кроме того, процесс сварки отнимает значительно меньше времени. Поэтому терминирование волокон через сварку получило значительно большее распространение, чем непосредственное терминирование.

После выполнения терминирования линейного ВОК производят подключение сетевого оборудования. Для этого могут использоваться одноволоконные (одиночные), двухволоконные (двойные) оптические шнуры или оконцованные с обеих сторон многоволоконные стационарные ВОК.

Оптический узел

В здание может заходить несколько линейных ВОК. В этом случае, наряду с задачей подключения приемо-передающего оборудования, может стоять задача внутренней коммутации (кросс-коммутации) волокон линейных ВОК.

Оптический узел является тем центром, где осуществляются разнообразные сопряжения волокон внешних и внутренних ВОК. Основные требования, которые предъявляются к оптическому узлу, – это его надежность и гибкость. По масштабу выполняемых функций оптические узлы можно разделить на: оптические распределительные устройства; оптические кроссовые устройства.

Оптические распределительные устройства (ОРУ)

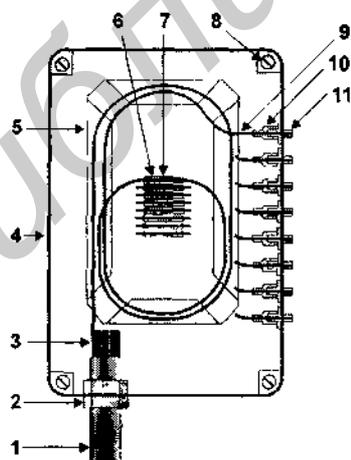
ОРУ могут устанавливаться в тех случаях, когда не требуется сложная коммутация волокон, например на удаленном сетевом узле или в центральном узле с небольшой концентрацией волокон. Как правило, ОРУ используются при построении волоконно-оптических магистралей локальных сетей на предприятиях, или при организации удаленного узла оптической телекоммуникационной системы. По способу терминирования волокон ОРУ относятся ко второму варианту – терминирование через сварку с pig-tail-ами.

К крупным зарубежным производителям ОРУ относятся ADC Telecommunications, AMP, Optronics, Telect, AT&T, появляются производители в Тайване.

В России ОРУ поставляются такими фирмами, как: "Вимком-Оптик", "Перспективные технологии", "Телеком Комплект Сервис".

В качестве ОРУ могут выступать: оптические распределительные коробки, оптические распределительные панели, оптические распределительные шкафы.

Оптические распределительные коробки (ОРК) предназначены для крепления на стену и выполняют функцию терминирования волокон внешнего ВОК требуемым типом оптических соединительных розеток, рис. 3.22. При монтаже ОРК происходит сварка оптических волокон предварительно разделанного внешнего кабеля с волокнами pig-tail-ов. Места сварки защищаются термоусаживающимися защитными гильзами (см. п. 3.2. Сварное соединение волокон), которые крепится в специальное гнездо. Pig-tail с внутренней стороны подключается к переходной розетке, установленной на боковой панели ОРК. Излишки волокон внешнего кабеля и pig-tail-ов укладываются в сплайс-пластину(ы). Pig-tail-ы заготавливаются заранее с типом коннектора, соответствующим типу переходных розеток.



- Обозначения:
- 1 – внешний ВОК;
 - 2 – гермоввод для крепления кабеля;
 - 3 – разделанные волокна внешнего ВОК;
 - 4 – корпус коробки;
 - 5 – сплайс-пластина;
 - 6 – КДЗС;
 - 7 – место сварки;
 - 8 – винт для крепления на стену;
 - 9 – волокно pig-tail-a;
 - 10 – коннектор pig-tail-a;
 - 11 – оптическая переходная розетка

Рис. 3.22. Схема разделки оптических волокон внутри ОРК

Наиболее распространенными типами розеток для многомодового волокна являются SC mm и SC sm, а для одномодового волокна – FC sm, SC sm. Оптические соединительные шнуры подключаются к соединительным розеткам с наружной стороны коробки.

К недостаткам ОРК можно отнести слабую защищенность оптических шнуров, неудобства наращивания системы, а также тот факт, что не все ОРК имеют возможность хранения излишков оптических шнуров. Преимущества ОРК – это простота конструкции, невысокая стоимость, отсутствие необходимости использования стойки. На рис. 3.23 показаны некоторые выпускаемые модели ОРК.

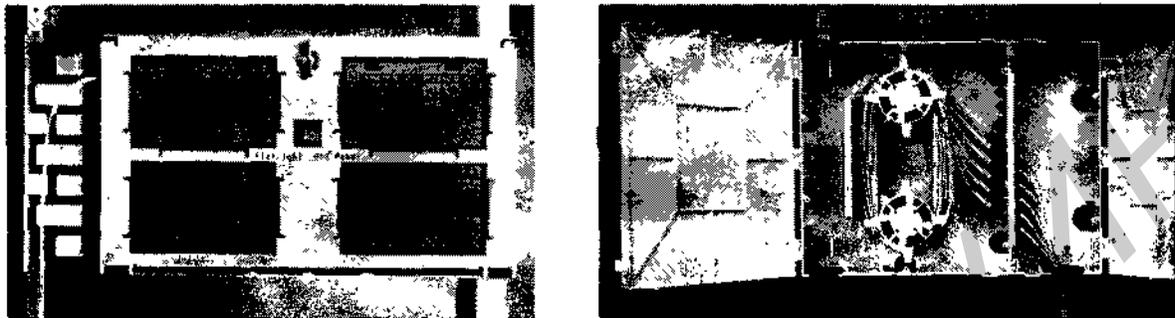


Рис. 3.23. Некоторые выпускаемые модели ОРК

Оптические распределительные панели (ОРП) в отличие от ОРК крепятся в стойку 19". Стоечный вариант дает больше преимуществ особенно тогда, когда приемо-передающее оборудование находится в той же стойке. Здесь упрощается подключение оптических шнуров. Концентрация оборудования в одной стойке повышает надежность системы и облегчает обслуживание. На рис. 3.24 показаны примеры ОРП. На рис. 3.24 а показана панель для терминирования, совмещенная со сплайс-модулем. Такая панель в количестве одной или нескольких штук может устанавливаться на небольших коммутационных узлах.

На рис. 3.24 б показана панель, предназначенная для непосредственного терминирования. Сплайс-бокс, от которого идет стационарный кабель к этой панели, может находиться в другой части той же стойки-секции или в другом помещении. Эта панель предназначена для использования на крупных коммутационных узлах.

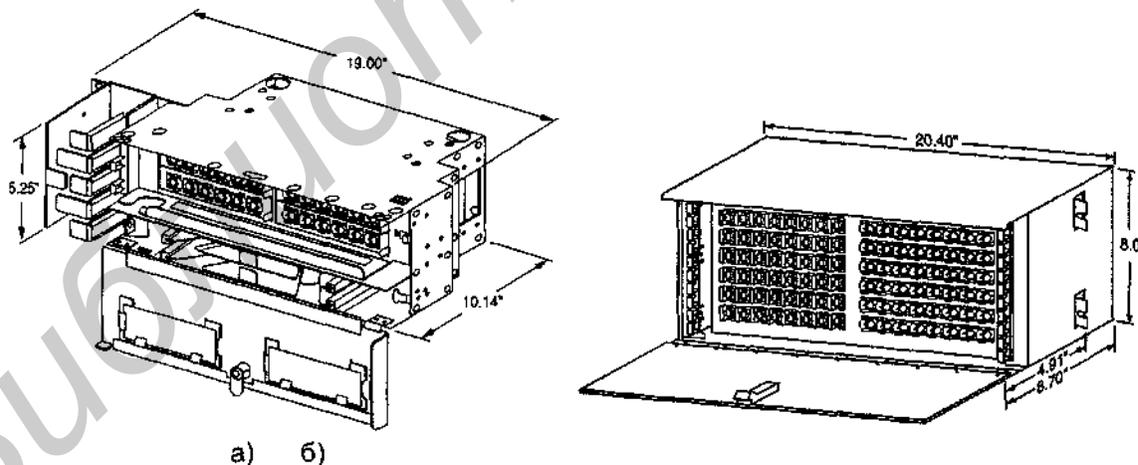


Рис. 3.24. Внешний вид оптических распределительных панелей: а) 24-позиционная панель для терминирования с совмещенным сплайс-модулем и вертикальным кабелепроводом; б) 72-позиционная панель, предназначенная для непосредственного терминирования

Оптические распределительные панели с притерминированным ВОК изготавливаются в заводских условиях и поставляются вместе с катушкой оптического кабеля, рис. 3.25. Допускается как стандартное исполнение, когда ОРП крепится в стойку до того, как начинает разматываться кабель, так и модифицированное исполнение, когда ОРП остается прикрепленной к катушке и вращается вместе с катушкой по мере разматывания кабеля. В модифицированном варианте ОРП можно отделить от катушки и установить в стойку, только после того, как весь кабель разматан. Модифицированный вариант хорошо подходит в тех случаях, когда кабель приходится протягивать через узкие отверстия. Зная расстояние до сплайс узла, можно в заказе притерминированной ОРП указывать соответствующую длину кабеля. Также при оформлении заказа можно задать требуемый стандарт соединителей и розеток, а также выбрать подходящее количество волокон, и тип ВОК.

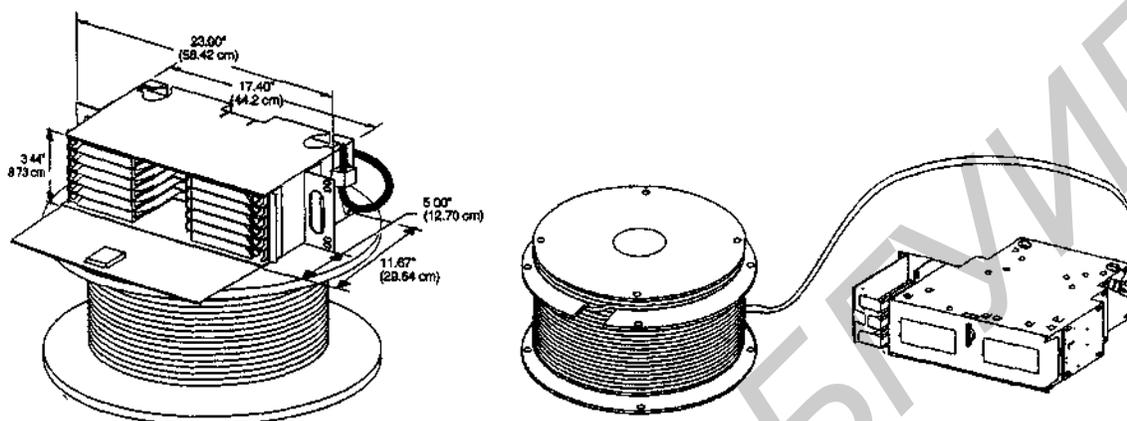


Рис. 3.25. Внешний вид оптической распределительной панели с притерминированным ВОК

Оптические распределительные шкафы (ОРШ) предназначены для терминирования волокон одного или нескольких внешних оптических кабелей. Шкафы выпускаются как для установки на пол, так и крепящиеся на стену. ОРШ отличаются от ОРП большими размерами и значительно большей емкостью волокон. ОРШ оснащаются дверцей и могут закрываться на ключ.

Приведем технические параметры ОРШ типа SFET, производства фирмы ADC Telecommunications [23].

Размеры (высота x ширина x глубина), см	91,4 x 81,3 x 33,2
Масса, кг	11,3
Число гермовводов сверху/снизу, шт	14 (7+7) / 14 (7+7)
Максимальное число терминирований, шт	144
Стандарты розеток (допускается смешанное использование)	SC, FC, ST, D4

Шкаф SFET настенного крепления предназначен для организации терминирования ВОК с возможностью кросс-контактных и интерконтактных соединений. Шкаф может служить демаркационным узлом между линейными и станционными ВОК.

Оптические кроссовые устройства (ОКУ)

При построении оптических узлов с большим количеством волокон от входящих линейных ВОК (>100) эффективность использования оптических распределительных устройств снижается. Для этой цели начинают лучше подходить специализированные кроссовые устройства, в которых задача коммутации волокон выходит на первый план при сохранении задачи распределения волокон. Они различаются емкостью и подразделяются на: оптические кроссы средней плотности – (внешних волокон 120-500) и оптические кроссы высокой (сверхвысокой) плотности – (внешних волокон >500).

Концепции оптических кроссов подробнее описаны в следующем параграфе.

В табл. 3.10 приводится классификация оптических распределительных и коммутационных узлов.

Таблица 3.10. Применение различных типов оптических распределительных и коммутационных устройств

Оптические устройства		Число входящих волокон от внешних ВОК					
		0 ÷ 8	8 ÷ 16	16 ÷ 32	32 ÷ 120	120 ÷ 500	>500
ОРУ	распределительная коробка	УУ	УУ, ЦУ	–	–	–	–
	распределительная панель	УУ	УУ, ЦУ	ЦУ	ЦУ	–	–
	распределительный шкаф	–	УУ, ЦУ	ЦУ	ЦУ	–	–
ОКУ	кросс	–	–	–	ЦУ	ЦУ	–
	кросс высокой плотности	–	–	–	–	ЦУ	ЦУ

Обозначения: ОРУ – оптическое распределительное устройство; ОКУ – оптическое кроссовое устройство; УУ – удаленный узел; ЦУ – центральный узел

Производители оптического распределительного и кроссового оборудования

В число крупных мировых производителей оптического распределительного и коммутационного оборудования входят компании: 3М; ADC Telecommunications; Lucent Technologies; Molex; Nortel; Reltec; Sincor; Telect.

Оптические кроссовые устройства главным образом применяются для организации центральных оптических узлов с большой концентрацией волокон. К таким узлам относятся центры телефонной коммутации, центры коммутации магистралей SDH/ATM. А заказчиками могут быть как телефонные компании, так и крупные операторы связи. В силу своего масштаба ОКУ несут значительно большую нагрузку, чем ОРУ. Сегодня стремительному росту применения оптических кроссовых устройств способствуют такие телекоммуникационные концепции, как "волокно в каждый дом" и "all-optical networks".

Интерконнект и кросс-коннект

ОКУ могут быть разработаны и установлены в расчете на: интерконнектное (interconnect) и кросс-коннектное подключение (cross-connect).

При интерконнектном подключении (ИКП) волокна всех внешних ВОК терминируются и подключаются к переходным розеткам оптических модулей с задней стороны устройства, оптические шнуры, идущие от сетевого оборудования, подключаются с передней стороны, рис. 3.26 а. Оптические распределительные устройства, рассмотренные в предыдущем параграфе, обеспечивают интерконнектное подключение.

Многие оптические узлы строятся на основе ИКП. В относительно небольших узлах ИКП продолжает использоваться тогда, когда критичность в безотказной работе узла не очень велика и низка потребность в реконфигурациях. Однако, по мере развития узла, особенно при достижении высокой концентрации входящих волокон, а также по мере возрастания требований по эксплуатации узла, интерконнектное подключение может оказаться далеко не самым эффективным. Крупный оптический узел обычно испытывает развитие, характеризуется регулярными процедурами тестирования различных волокон, непрерывного мониторинга, подстраивается под новые приложения. Кроме этого, он должен отвечать требованиям высокой надежности и быстрого обнаружения и устранения повреждений. Всем этим требованиям удовлетворяют оптические узлы, выполненные на основе кросс-коннектного подключения, каковыми и являются оптические кроссовые устройства.

При кросс-коннектном подключении (ККП), свойственном кроссовым устройствам, волокна всех внешних и внутренних ВОК, а также всевозможные оптические шнуры и терминированные станционные ВОК, идущие от сетевого оборудования, подключаются к переходным розеткам с задней стороны устройства. Коммутация (кросс-коммутация) всех этих окончаний волокон осуществляется с передней стороны при помощи дополнительных коммутационных шнуров, рис. 3.26 б.

Удобство и гибкость при обслуживании кросс-контактных систем делают их наиболее привлекательными для сложных узлов. Кросс-контактную систему рекомендуется устанавливать по следующим причинам:

- 1 конфигурация с ККП упрощает наращивание системы без риска повреждения волокон;
2. подключение (или терминирование) с задней стороны устройства линейных, станционных ВОК, а также оптических шнуров от приемо-передающего оборудования повышают их защищенность (к ним больше не нужно прикасаться, а можно оперировать только с коммутационными оптическими шнурами);
- 3 кросс-контактное поле упрощает операции в аварийных и непредвиденных ситуациях.

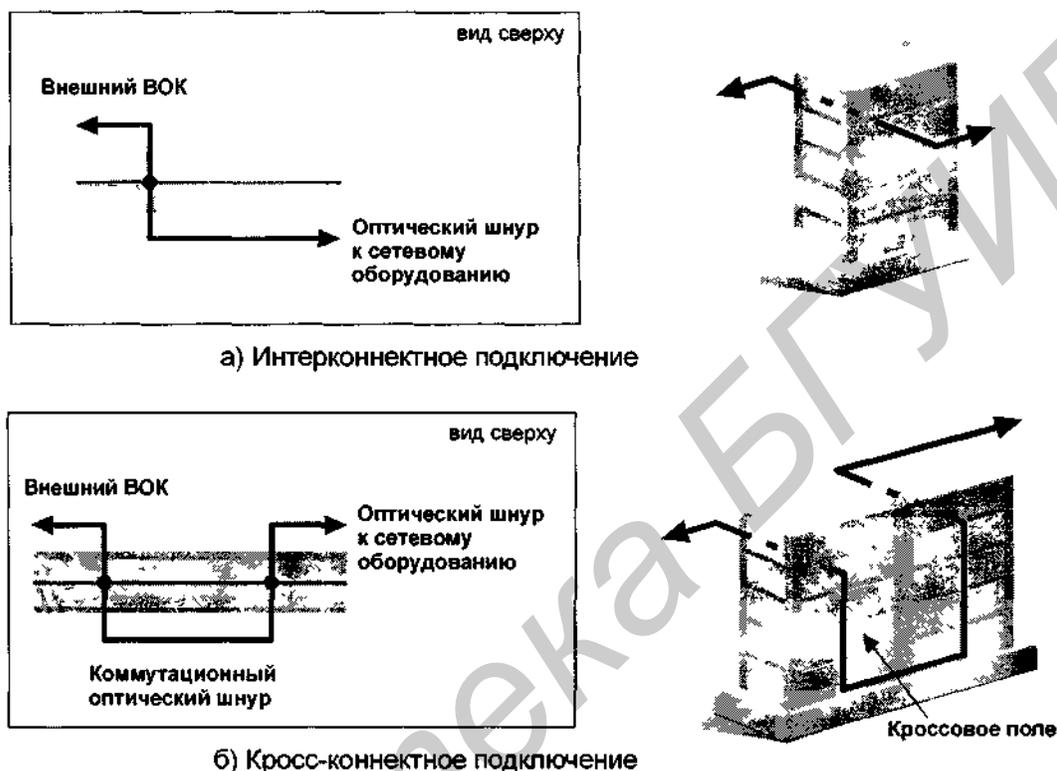


Рис. 3.26. Интерконнектная и кросс-коннектная системы

Принципы построения оптического кроссового устройства

ОКУ, по своей природе ориентированные на кросс-коннектное подключение, могут строиться как с нуля, начиная с одной или нескольких стоек, так и посредством модернизации узла, на котором ранее уже использовались оптические распределительные панели с интерконнектным подключением.

При строительстве с нуля в стойку крепятся оптические распределительные панели, к которым с задней стороны подключаются оконцованные волокна линейных и станционных ВОК. Допускаются панели с притерминированным ВОК.

Модернизация выполняется в три этапа. На первом этапе добавляются панели с переходными розетками, тем самым создается необходимое кроссовое поле. На втором этапе выполняется переподключение оптических шнуров, идущих от приемо-передающего оборудования, с передней стороны на заднюю сторону к вновь установленным розеткам. На третьем этапе выполняется подключение на кроссовом поле дополнительных оптических шнуров, и, тем самым, воссоздаются непрерывные оптические каналы связи. Сплайс-боксы могут размещаться в этих же стойках, или при большой концентрации волокон занимать отдельный сплайс модуль, рис. 3.27.

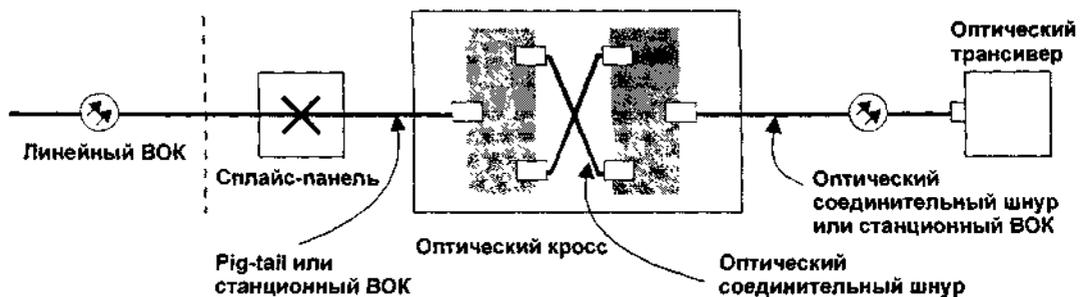


Рис. 3.27. Общая схема подключения приемо-передающего оборудования

ОКУ могут укомплектовываться или наращиваться оптическими модулями по мере необходимости. Модульная система защищает заказчика от больших капиталовложений на ранней стадии развития.

Обслуживание ОКУ

Основные элементы обслуживания ОКУ следующие: заготовка, хранение и добавление оптических шнуров; логистика; непрерывный мониторинг линий связи; ведение электронной базы данных.

Заготовка, хранение и добавление оптических шнуров. Для ОКУ типично, что все постоянные подключения подходят сзади, а все переподключения происходят спереди. Это очень удобно для обслуживающего персонала, которому нужно только иметь определенное количество оптических шнуров нужной длины. Отметим, что при заготовке оптического шнура следует брать его длину не меньше 5 м. При такой длине на рефлектограмме можно разрешить два скачка от точек терминирования, и, тем самым, идентифицировать обе панели, к которым подключен оптический шнур. Для крупных многосекционных кроссов длина коммутационных оптических шнуров может быть еще больше.

При подключении оптического шнура следует выполнить последовательность действий, показанных на рис. 3.28.

- Шаг 1. Подключается один конец оптического шнура к соответствующей переходной розетке (секция 1).
- Шаг 2. Проводится оптический шнур вниз через вертикальную кабелеводную систему на секции 1.
- Шаг 3. Проводится оптический шнур через нижнюю кабелеводную систему к промежуточной панели барабанов.
- Шаг 4. Подключается второй конец оптического шнура к соответствующей переходной розетке (секция 3).
- Шаг 5. Проводится оптический шнур вниз через вертикальную кабелеводную систему на секции 3.
- Шаг 6. Набрасывается петля на соответствующий барабан промежуточной панели барабанов.
- Шаг 7. Проводится оптический шнур вниз через вертикальные кабелеводные системы, расположенные по обеим сторонам от промежуточной панели барабанов (секции 2, 3).

Под *логистикой* (logistics) понимается ведение журнала по обслуживанию кросса, занесение информации о профилактических работах, установка ярлыков (этикеток) на оптические шнуры, на крышках оптических панелей с информацией о каналах подключения и т.п. Чтобы идентифицировать подключение, достаточно только идентифицировать оптический коммутационный шнур – от какой розетки на одной панели к какой розетке на другой панели он идет.

Непрерывный мониторинг линий связи – предполагает использование оптических рефлектометров. Непрерывный мониторинг может осуществляться по свободным волокнам линейного ВОК или по задействованным волокнам на длине волны, отличной от той, по которой передаются данные. В последнем случае требуется аппаратура волнового уплотнения. Если на узел сходится большое количество линейных ВОК, то рефлектометр может работать совместно с электронным оптическим устройством коммутации волокон. Оптические рефлектометры и коммутационные устройства могут быть установлены на нескольких узлах, а удален-

ное управление над ними позволяет реализовать единый мониторинг всей сети из центрального оптического узла.

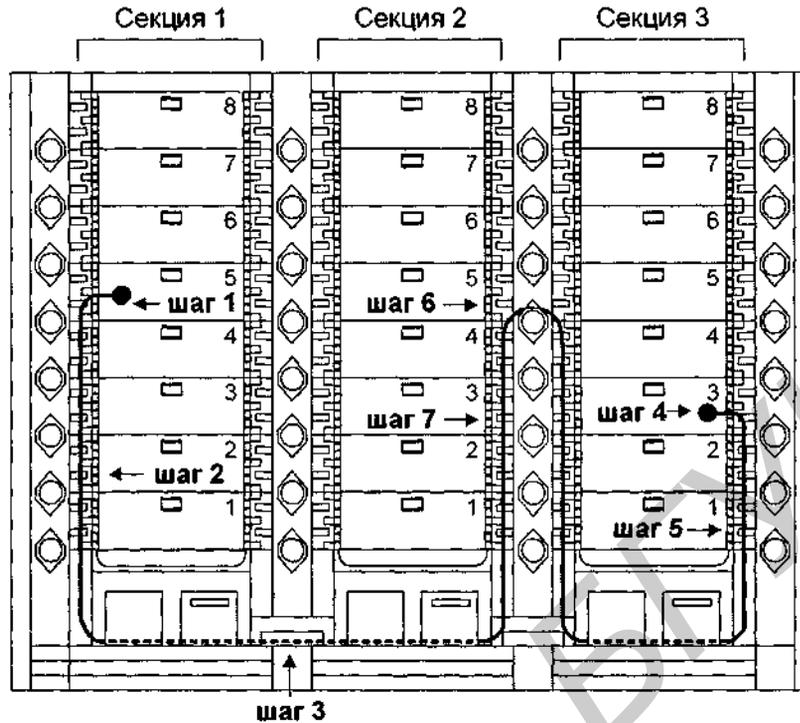


Рис. 3.28. Порядок подключения оптического коммутационного шнура

Ведение электронной базы данных стало неотъемлемой чертой администрирования и обслуживания как крупных оптических кроссов, так и целой распределенной магистральной волоконно-оптической сети. К числу наиболее продвинутых продуктов программного обеспечения относятся FiberBase™ фирмы ADC Telecommunications [24] и OSP InSight фирмы Advanced Fiber Optics [25].

Оптические кроссы высокой и сверхвысокой плотности

Беспрецедентное развитие телекоммуникационной индустрии во многом обусловлено масштабным развертыванием волоконно-оптических систем в последние несколько лет. Как результат, многие компании операторы связи обнаруживают, что их существующие оптические узлы близки к переполнению из-за растущей кабельной массы. Возникает вопрос, как лучше решить задачу наращивания?

В табл. 3.11 приведены основные характеристики двух продуктов фирмы ADC Telecommunications – лидера в области производства оптических кроссов: оптического распределительного кросса F3DF, оптического распределительного кросса сверхвысокой плотности FMDF.

Таблица 3.11. Характеристики оптических распределительных кроссов производства ADC [26, 27]

Характеристики	ОПК высокой плотности F3DF	ОПК сверхвысокой плотности FMDF
Н x W x D (см ³)	214 x 58 /77* (с вертикальным кабелеводом) x 30	214 x 66 x 61
Поддерживаемые типы разъемов	SC, Angled SC, FC, Angled FC, D4, ST, Duplex SC, MIC (FDDI)	SC, Angled SC, FC, Angled FC
Максимальное число терминирований на секцию	576** (8 модулей x 72 термин./модуль)	864 (12 FTB*** блоков x 72 термин./блок)
Число терминирований в секционном исполнении	1728	2592
Максимальное рекомендованное число секций в ряд	8	60
Поддержка встраивания оптических разветвителей (модули VAM)	1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, (соединители SC PC, FC PC, SC, 8 ⁰ Angled SC, FC, 8 ⁰ Angled FC, ST, 8 ⁰ Angled ST)	1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6 (соединители SC PC, FC PC, SC, 8 ⁰ Angled SC, FC, 8 ⁰ Angled FC)

* – Ширина стойки 58 см без учета вертикального кабелевода и 77 см с учетом.

** – Это число предполагает, что все пространство выделено под распределительные модули, на практике часть места (или отдельные секции целиком) занимают оплайс модули.

*** – Блок FTB (fiber terminal bloc) может поставляться с притерминированным стационарным кабелем.

Выделим одно из главных преимуществ FMDF перед F3DF – рекордно большое (60 против 8) число секций. Ограничение числа секций в кроссовых системах F3DF связано, главным образом, с резким увеличением количества линейных соединительных шнуров. В итоге, при 8-ми секциях слой шнуров (миникабеля) в нижнем горизонтальном кабелеводе начинает превышать 5 см. В кроссах FMDF эта проблема снимается, поскольку существует 6 параллельных горизонтальных кабелеводных систем, расположенных на разной высоте.

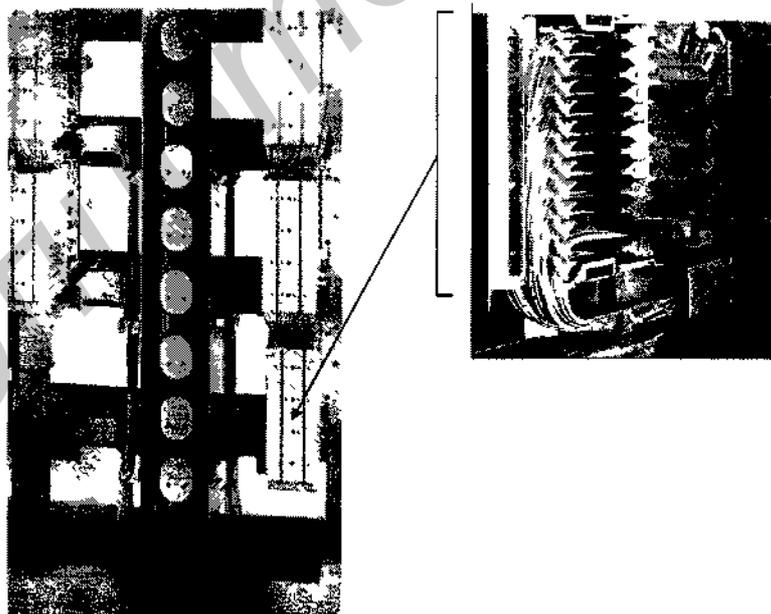


Рис. 3.29. Внешний вид секции системы сверхвысокой плотности FMDF и одного терминального блока FTB на 72 позиции

Примеры инсталляции кроссового оборудования

Общий вид организации сетевого узла с использованием оптического кроссового оборудования показан на рис. 3.30.

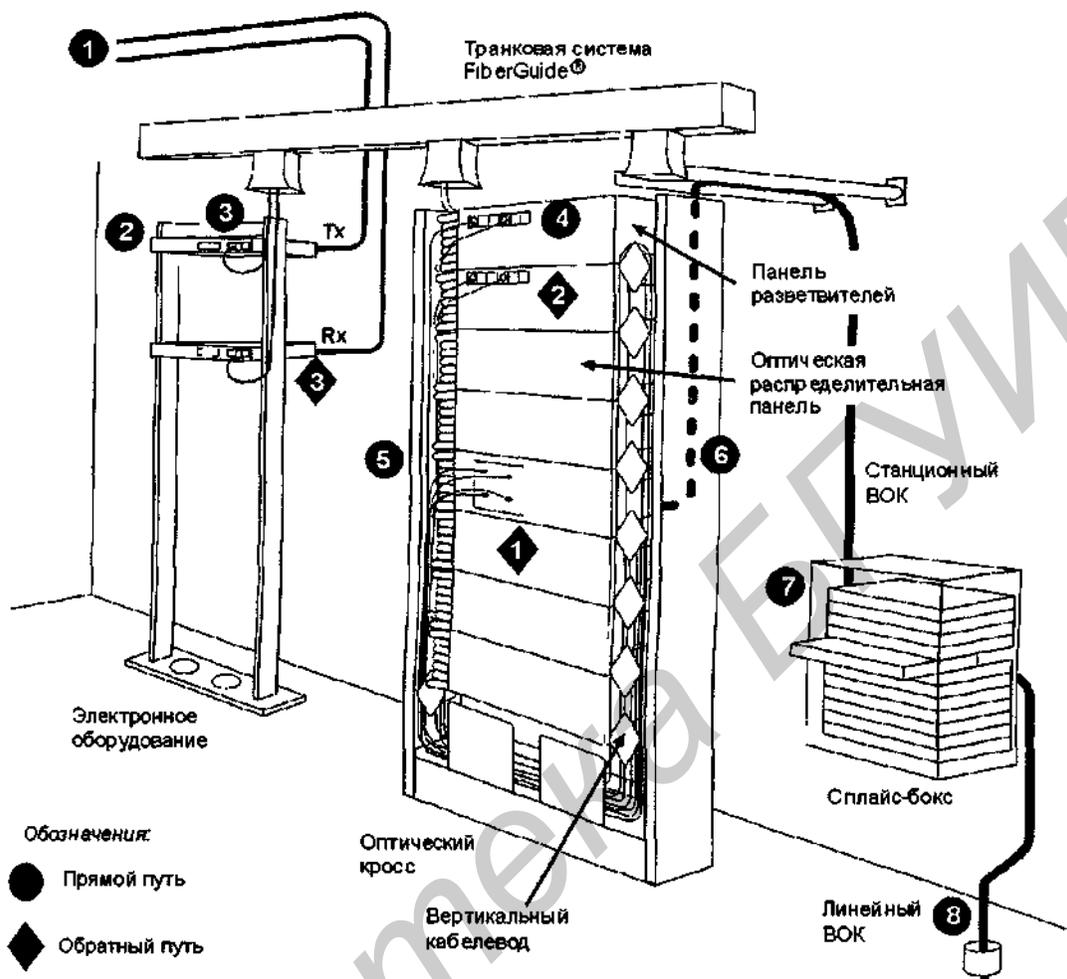


Рис. 3.30. Общая схема оптического распределительного узла кабельного телевидения

Прямой путь. Широкополосный телевизионный сигнал идет по коаксиальному кабелю 1, попадает на оптический широкополосный передатчик 2, где происходит преобразование электрического сигнала в оптический 3. Оптический сигнал далее идет по соединительному шнуру, проложенному в транковой системе, до оптического кросса, где попадает на вход оптического разветвителя 4. К выходам разветвителя подключаются несколько соединительных кроссовых шнуров, которые идут на оптическую распределительную панель 5. На эту же панель сзади выведен станционный ВОК 6, который идет в сплайс-бокс 7. В сплайс-боксе выполнена сварка волокон станционных 6 и линейных 8 ВОК.

Обратный путь. Видеосигналы с удаленных оптических узлов приходят на оптическую распределительную панель 1. С оптической панели через оптические соединительные шнуры сигналы попадают на входы разветвителей для обратного канала 2. Выходной сигнал с разветвителя идет на оптический приемник 3, где преобразовывается в широкополосный электрический сигнал.

4. Электронные компоненты систем оптической связи

4.1. Передающие оптоэлектронные модули

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в волоконно-оптических системах, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. Последние должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производятся весьма разнообразные ПОМ, отличающиеся по конструкции, а также по типу источника излучения. Одни работают на телефонных скоростях с максимальным расстоянием до нескольких метров, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояния в несколько десятков километров.

Типы и характеристики источников излучения

Главным элементом ПОМ является источник излучения. Перечислим основные требования, которым должен удовлетворять источник излучения, применяемый в ВОЛС:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности волокна. В традиционных оптических волокнах существует три окна, в которых достигаются меньшие потери света при распространении: 850, 1300, 1550 нм;
- источник излучения должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации на требуемой скорости;
- источник излучения должен быть эффективным, в том смысле, что большая часть излучения источника попадала в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточно большую мощность, чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния, но и не на столько, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно или оптический приемник;
- температурные вариации не должны сказываться на функционировании источника излучения;
- стоимость производства источника излучения должна быть относительно невысокой.

Два основных типа источников излучения, удовлетворяющие перечисленным требованиям, используются в настоящее время – светодиоды (LED) и полупроводниковые лазерные диоды (LD).

Главная отличительная черта между светодиодами и лазерными диодами – это *ширина спектра излучения*. Светоизлучающие диоды имеют широкий спектр излучения, в то время как лазерные диоды имеют значительно более узкий спектр, рис. 4.1 [1, 2]. Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

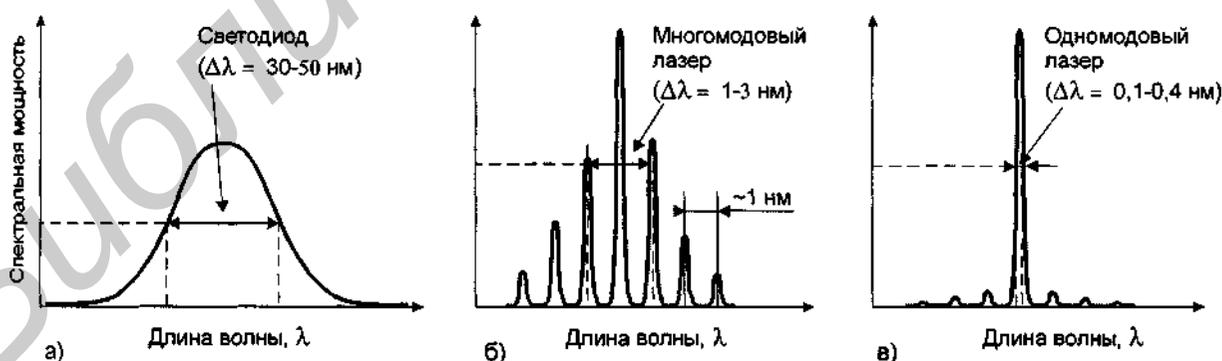


Рис. 4.1. Спектры излучения светодиодов и лазерных диодов

Светоизлучающие диоды

Благодаря своей простоте и низкой стоимости, светодиоды распространены значительно шире, чем лазерные диоды.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока, рис. 4.2 а. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (р- и n-слоя) вследствие подачи напряжения на р-п структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света.

Длина волны излучения λ (мкм) связана с шириной запрещенной зоны активного слоя E_g (эВ) законом сохранения энергии $\lambda = 1,24/E_g$, рис. 4.2 б.

Показатель преломления активного слоя выше показателя преломления ограничивающих пассивных слоев, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

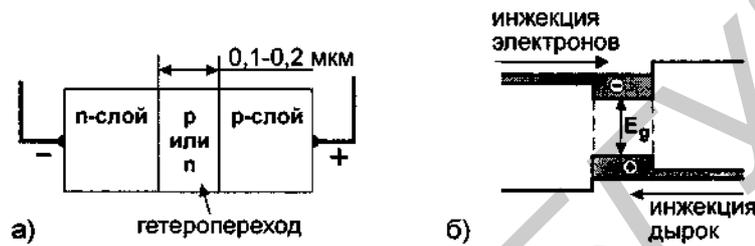


Рис. 4.2. Двойная гетероструктура: а) гетероструктура; б) энергетическая диаграмма при прямом смещении

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку, табл. 4.1.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ – как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной.

Таблица 4.1. Композиционные материалы, используемые для создания источников излучения различных длин волн [2]

Активный материал	Подложка	Диапазон возможных значений E_g , эВ	Диапазон излучаемых длин волн λ , нм
$Ga_{(1-x)}Al_xAs$	GaAs	2,02...1,42	610...870
$In_{(1-x)}Ga_xAs_yP_{(1-y)}$	InP	0,95	1100...1700
$In_{0,73}Ga_{0,27}As_{0,58}P_{0,42}$	InP	0,95	1310
$In_{0,58}Ga_{0,42}As_{0,9}P_{0,1}$	InP	0,80	1550

Лазерные диоды

Два главных конструктивных отличия есть у лазерного диода по сравнению со светодиодом. Первое, лазерный диод имеет встроенный оптический резонатор. Второе, лазерный диод работает при значительно больших значениях токов накачки, чем светодиод, что позволяет при превышении некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения. Именно такое излучение характеризуется высокой когерентностью, благодаря чему

лазерные диоды имеют значительно меньше ширину спектра излучения (1-2 нм) против 30-50 нм у светодиодов, рис. 4.1.

Зависимость мощности излучения от тока накачки описывается ватт-амперной характеристикой лазерного диода. При малых токах накачки лазер испытывает слабое спонтанное излучение, работая как малоэффективный светодиод. При превышении некоторого порогового значения тока накачки I_{thres} , излучение становится индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности, рис. 4.3.

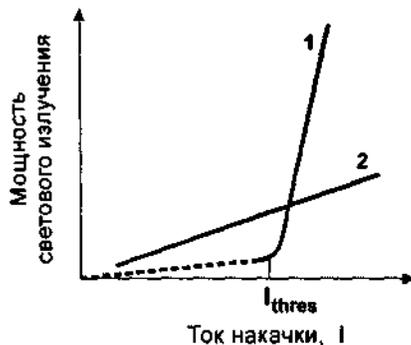


Рис. 4.3. Ватт-амперные характеристики:
1 - лазерного диода;
2 - светодиода

Мощность выходного излучения P_{out} или выходная мощность излучения светодиода (output power) отражает мощность вводимого в волокно излучения. Наряду с традиционной единицей измерения Вт она может измеряться в дБм. Мощности P_{out} , измеренной в мВт (10^{-3} Вт), будет соответствовать мощность $p_{out} = 10 \lg P_{out}$ (дБм). Использование единицы измерения дБм упрощает энергетический расчет бюджета линий. Мощность излучения, приводящаяся в характеристиках оптического передатчика, может варьироваться в некотором диапазоне. В таких случаях указывают диапазон мощности излучения (output power range). Например, $-19/-14$ дБм означает, что $p_{out min} = -19$ дБм, а $p_{out max} = -14$ дБм.

В магистральных ВОЛС используются два окна 1,3 и 1,55 мкм. Поскольку наименьшее затухание в волокне достигается в окне 1,55 мкм, на сверхпротяженных безретрансляционных участках ($L \approx 100$ км) эффективней использовать оптические передатчики именно с этой длиной волны. В то же время на многих магистральных ВОЛС в состав ВОК входят только ступенчатые одномодовые волокна, имеющие минимум хроматической дисперсии в окрестности 1,3 мкм (волокна со смещенной дисперсией нет). На длине волны 1,55 мкм удельная хроматическая дисперсия у SMF составляет 17 пс/нм км. А поскольку полоса пропускания обратно пропорциональна ширине спектра излучения, то увеличить полосу пропускания можно только уменьшая ширину спектра излучения лазера. Из табл. 2.4 (глава 2) видно, что при ширине спектра $\Delta\lambda \approx 4$ нм полоса пропускания на 100 км составляет 63 МГц, а при $\Delta\lambda = 0,2$ нм соответственно 1260 МГц. Итак, для того чтобы оптические передатчики на длине волны 1,55 мкм могли в равной степени использоваться на протяженной линии не только с одномодовым волокном со смещенной дисперсией (DSF), но и со ступенчатым волокном (SMF), необходимо делать ширину спектра излучения передатчиков как можно меньше.

Четыре основных типа лазерных диодов получили наибольшее распространение: с резонатором Фабри-Перо; с распределенной обратной связью; с распределенным брэгговским отражением; с внешним резонатором.

Лазерные диоды с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot). Резонатор в таком лазерном диоде образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу.

На рис. 4.1 б показан спектр излучения промышленного лазерного диода с использованием резонатора Фабри-Перо. Как видно из рисунка, наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Причина их возникновения связана с условиями образования стоячих волн. Для усиления света опреде-

ленной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению $2D = N\lambda$, где D – диаметр резонатора Фабри-Перо, а N – некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излучением. Если этот диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область $\Delta\lambda_{0,5}$ могут попасть два или более соседних максимумов, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нм. FP лазер имеет далеко не самые высокие технические характеристики, но для тех приложений, где не требуется очень высокая скорость передачи данных, он, в силу более простой конструкции, наилучшим образом подходит с точки зрения цена-эффективность.

Следует отметить, что даже в том случае, когда соседние максимумы малы, то есть когда реализуется одномодовый режим излучения и $\Delta\lambda$ мало, с ростом скорости передачи у FP лазера наблюдается перераспределение мощности в модах, которое приводит к паразитному эффекту – динамическому уширению спектра $\Delta\lambda$ (до 10 нм при частоте модуляции 1-2 ГГц)

Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других более совершенных типов лазерных диодов, отличающихся способом организации оптического резонатора, и являющихся в некоторой степени модернизацией простого резонатора Фабри-Перо [2].

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер). Резонаторы у этих двух довольно схожих типов представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри-Перо, в которой добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис. 4.4 а), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис. 4.4 б). Периодическая структура влияет на условия распространения и характеристики излучения. Так, преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100-процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/°C, в то время как для DFB лазера порядка 0,07-0,09 нм/°C. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

Лазерный диод с внешним резонатором (ЕС лазер). В ЕС лазерах один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. На рис. 4.4 в) показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза.

Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, – это эквивалентно изменению шага решетки – можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 нм. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС [3]. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

Другие характеристики

Также важными характеристиками источников излучения являются: быстродействие источника излучения; деградация и время наработки на отказ.

Быстродействие источника излучения. Экспериментально измеряемым параметром, отражающим быстродействие источника излучения, является максимальная частота модуляции. Предварительно устанавливаются пороги на уровне 0,1 и 0,9 от установившегося значения мощности светового излучения при низкочастотной модуляции прямоугольными импульсами тока. По мере роста частоты модуляции, т.е. при переходе на меньшие масштабы по временной шкале, форма световых фронтов становится более пологой. Для описания фронтов вводятся времена нарастания τ_{rise} и спада τ_{fall} мощности излучения, определяемые как временные интервалы, за которые происходит нарастание от 0,1 до 0,9 и, наоборот, спад светового сигнала от 0,9 до 0,1. Максимальная частота модуляции определяется как частота входных элек-

трических импульсов, при которой выходной оптический сигнал перестает пересекать пороговые значения 0,1 и 0,9, оставаясь при этом во внутренней области. Для светодиодов эта частота может достигать до 200 МГц, а у лазерных диодов – значительно больше (несколько ГГц). Времена нарастания и спада предоставляют информацию о полосе пропускания W . Если предположить, что они равны между собой (а это не всегда так), то полосу пропускания можно определить по формуле (2-8): $W = 0,35/\tau_{\text{пс}}.$

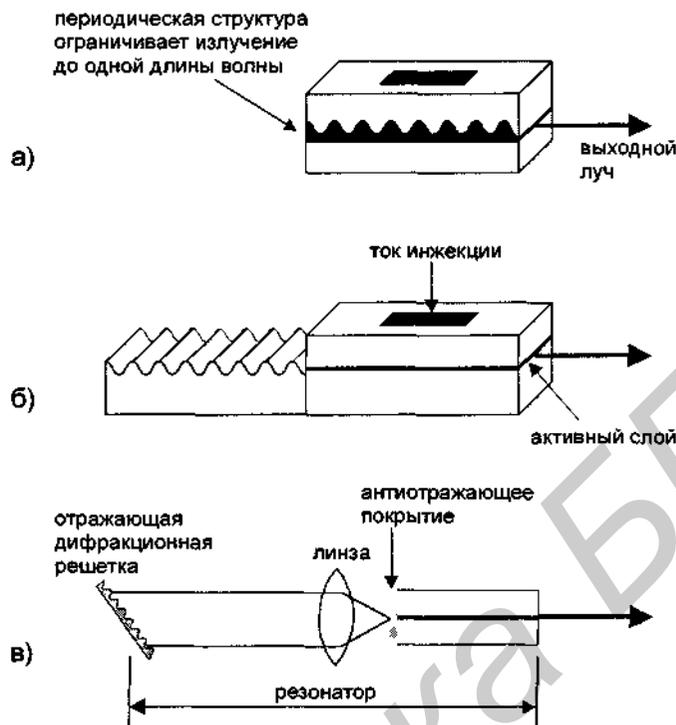


Рис. 4.4. Три основных типа лазерных диодов:
 а) лазер с распределенной обратной связью, DFB лазер;
 б) лазер с распределенным брэгговским отражением, DBR лазер;
 в) лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер

Деградация и время наработки на отказ. По мере эксплуатации оптического передатчика его характеристики постепенно ухудшаются – падает мощность излучения, и, в конце концов, он выходит из строя. Это связано с деградацией полупроводникового слоя. Надежность полупроводникового излучателя определяется средней наработкой на отказ или интенсивностью отказов. Лазерные диоды, выпускаемые десять лет назад, обладали значительно меньшей надежностью по сравнению со светодиодами. Однако в настоящее время, благодаря совершенствованию конструкций и технологии изготовления, удалось значительно повысить надежность лазерных диодов и приблизить их к светодиодам по времени наработки на отказ, которое составляет до 50000 часов и более (5-8 лет).

Основные элементы ПОМ

Для организации передачи оптических сигналов не достаточно иметь только источник излучения. В любой конструкции ПОМ есть специальный *держатель* (housing), который позволяет закрепить и защитить составные элементы передатчика: источник излучения, узел электрического интерфейса и место сопряжения с волокном. Иногда требуются дополнительные внутренние элементы для оптимального подсоединения волокна. Важным элементом лазерных диодов является цепь тока накачки, и система контроля температуры. Для сложных лазерных систем добавляют выходной мониторинг оптического сигнала. Общая схема конструкции оптического передатчика, в которой не все элементы являются обязательными, показана на рис 4 5, [4]

Поставщики. Крупными поставщиками передатчиков являются фирмы: Epitaxx Inc., Ericsson Components Ab, Fujitsu Microelectronics Inc., Hamamatsu Corp., Hewlett-Packard, Hitachi, Lasertron Inc., Laser Diode Inc., NEC Electronics Inc., OKI Semiconductors, Optek Technology Inc., Optical Communication Product Inc., Ortel Corp., Siemens Corp. и др. [5].

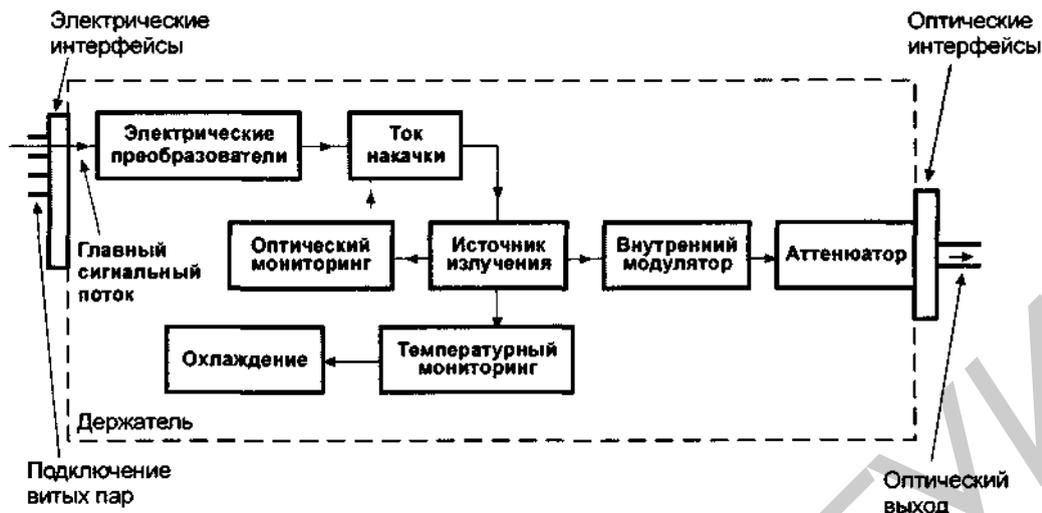


Рис. 4.5. Составляющие элементы передающего оптоэлектронного модуля (ПОМ)

4.2. Приемные оптоэлектронные модули

Приемные оптоэлектронные модули (ПРОМ) являются важными элементами волоконно-оптической системы. Их функция – преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический. Последний обрабатывается далее электронными устройствами.

Основные элементы приемных оптоэлектронных модулей

Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную к обработке;
- демодулятор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

На практике функциональные элементы могут несколько отличаться у разных ПРОМ. Например, детектор типа лавинный фотодиод обеспечивает внутреннее усиление, в результате чего собственные шумы последующего электронного усилителя становятся не столь заметными по сравнению с уровнем полезного сигнала. В некоторых ПРОМ отсутствует демодулятор, или цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода каскада усилителей приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед детектором устанавливается оптический усилитель.

На рис. 4.6 приведены функциональные элементы аналогового (а) и цифрового (б) ПРОМ. Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе также выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются требования высокой линейности преобразования и усиления сигнала при минимуме вносимых шумов – в противном случае возрастают искажения сигнала. На протяженных линиях с большим количеством приемо-передающих узлов искажения и шумы накапливаются, что снижает эффективность аналоговых многократных линий связи.

При цифровой передаче не требуется очень точная ретрансляция форм импульсов. Цифровой приемник должен включать узел принятия решения или дискриминатор, имеющий установленные пороги на принятие сигналов 0 и 1, который распознает, какой сигнал пришел, устраняет шумы и восстанавливает необходимую амплитуду сигнала. Правильное выделение нужного сигнала может происходить при большом уровне шумов.

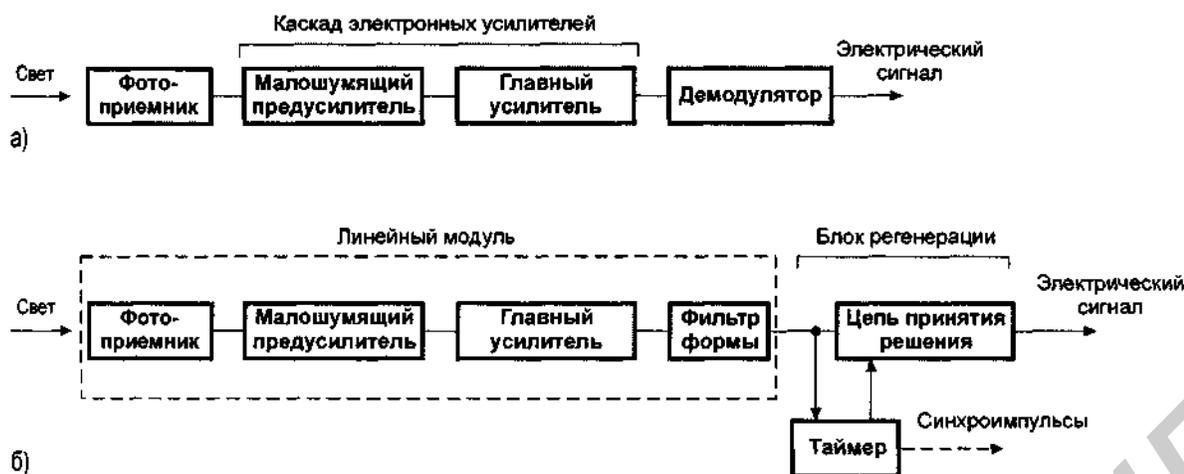


Рис. 4.6. Функциональные элементы приемных оптоэлектронных модулей (ПРОМ):
 а) аналогового; б) цифрового

Различают *синхронные* и *асинхронные* режимы приема-передачи цифрового сигнала [6]. Упрощенное описание каждого из методов приведено ниже. При *синхронном режиме* битовый поток между приемником и передатчиком носит непрерывный характер. При *асинхронном режиме* данные передаются в виде организованных битовых последовательностей – пакетов. В промежутках между пакетами линия молчит – сигнала нет. При синхронном режиме приема-передачи таймер приемника выделяет в приходящей битовой последовательности специальные сигналы – синхроимпульсы, на основании которых приемник регулярно настраивает или подстраивает свои часы. При *асинхронном режиме* приема-передачи приемник имеет свой независимый таймер. Принимая начальные биты пакета (преамбулу), таймер приемника настраивает узел принятия решения так, чтобы определение приходящего бита выполнялось на его середине. Электрический сигнал, который выдает узел принятия решения, идет на частоте таймера. Так как есть погрешность у разных таймеров, то, по мере принятия последующих битов пакета, момент определения приходящего бита плавно смещается в одну из сторон от носителя середины приходящего бита. Для правильной идентификации всех битов пакета важно, чтобы смещение за время принятия пакета не превысило 0,5 бита. Это приводит к ограничению на максимальную длину пакета. Чем меньше погрешность таймеров, тем большая длина пакета может использоваться для передачи.

Принципы работы фотоприемника

Основным элементом ПРОМ является фотоприемник, изготавливаемый обычно из полупроводникового материала. В основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с р-п переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников, применяемых ВОЛС, получили распространение р-і-п фотодиоды, лавинные фотодиоды, фототранзисторы.

Рассмотрим принципы работы фотоприемника на примере р-і-п фотодиода, для которого характерно наличие і-слоя (слаболегированного полупроводника п-типа) между слоями р⁺- и п⁺-типа (+ означает сильное легирование), рис. 4.7 а. Также і-слой называют обедненным слоем, поскольку в нем нет свободных носителей. На р-і-п структуру подается напряжение с обратным смещением U_0 (по сравнению со светоизлучающим диодом). Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического поля (градиент потенциала) создается в і-слое. Но поскольку нет свободных носителей в і-слое, нет и электрического тока, так что і-слой испытывает только поляризацию. При наличии падающего излучения на і-слой, в нем образуются свободные электронно-дырочные пары. Они под дей-

ствием электрического поля быстро разделяются и движутся в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Эффективным является взаимодействие излучения только с i-слоем, так как при попадании фотонов в p⁺- и n⁺-слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать p⁺- и n⁺-слои как можно тоньше, а обедненную область достаточно большой протяженности, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет.

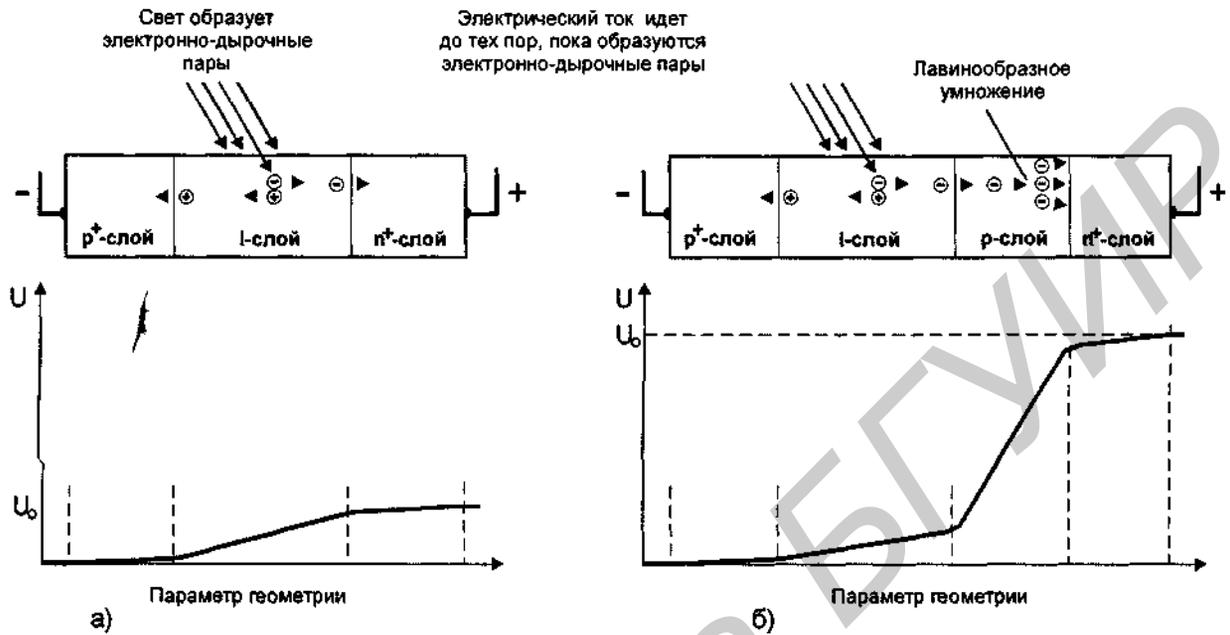


Рис. 4.7. Структура, включение и распределение потенциала:
 а) p-i-n фотодиода; б) лавинного фотодиода

Фотодиоды могут изготавливаться из разных материалов. Рабочие диапазоны длин волн, в которых достигается максимальная эффективность фотодиодов для разных полупроводниковых материалов, приведены в табл. 4.2.

Эффективность (квантовая) обедненной области в рабочем диапазоне длин волн достаточно высока ~ 80-100%. Однако часть падающего излучения испытывает френелевское отражение от фоточувствительной поверхности из-за скачка показателей преломления на границе между этой поверхностью и средой. Для уменьшения отражения приемную поверхность обедненного слоя покрывают антиотражающим слоем – специально подобранным прозрачным для длины волны излучения λ материалом толщиной кратной $\lambda/4$ и показателем преломления, равным $\sqrt{n_1 n_2}$, где n_1 и n_2 – показатели преломления i-слоя и воздуха.

Таблица 4.2. Элементы и композиционные материалы, используемые для создания фотоприемников различных длин волн [4]

Материал	Диапазон принимаемых длин волн λ , нм
Кремний	400-1000
Германий	600-1600
GaAs	800-1000
InGaAs	1000-1700
InGaAsP*	1100-1600

* – зависит от степени легирования

Технические характеристики фотоприемников

Факторы, влияющие на технические характеристики фотоприемников, сложны и сильно взаимосвязаны между собой. На первый взгляд может показаться, что достаточно выбрать только три параметра – чувствительность, быстродействие, цену. На практике эти факторы часто оказываются зависящими от других факторов, включая рабочую длину волны, выбор волокна и передатчика, темновой ток, шумовые характеристики, тип кодировки передаваемого сигнала и др.

Ниже рассмотрены главные из них: токовая чувствительность; квантовая эффективность; темновой ток; время нарастания и спада; эквивалентная мощность шума; соотношение сигнал/шум и чувствительность аналоговых систем; частота появления ошибок и чувствительность цифровых систем; насыщение ПРОМ; максимально допустимое обратное напряжение; рабочий диапазон температур; наработка на отказ.

Токовая чувствительность (монохроматическая) S_{ph} (А/Вт) определяется как $S_{ph} = I_{ph} / P(\lambda)$, где I_{ph} – фототок, а $P(\lambda)$ – полная оптическая мощность излучения на длине волны λ , падающего на фоточувствительную площадку. Токовая чувствительность характеризует фотоприемник при низких частотах модуляции.

Квантовая эффективность η (безразмерная величина) определяется как $\eta = N_e / N_{ph}$, где N_{ph} – количество фотонов, падающих за единицу времени на приемник, а N_e – количество рожденных в результате этого свободных электронов (или электронно-дырочных пар). Квантовая эффективность для р-і-п фотодиодов не может быть больше 1 (100%). Кривые квантовой эффективности в зависимости от длины волны для разных материалов приведены на рис. 4.8.

Между токовой чувствительностью и квантовой эффективностью существует простая связь $S_{ph} = \frac{e\lambda}{hc} \eta$, где e – заряд электрона ($1,60 \cdot 10^{-19}$ К), λ – длина волны, h – постоянная Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек), c – скорость света ($3,00 \cdot 10^8$ м·сек⁻¹). С подстановкой значений констант получаем $S_{ph} = \frac{\lambda}{1,24} \eta$. На основании зависимостей рис. 4.8 легко оценить значения

токовой чувствительности для разных материалов и разных длин волн. Типичное значение токовой чувствительности для р-і-п фотодиодов в их рабочих диапазонах составляет 0,5-0,8 А/Вт, а для лавинных фотодиодов 20-60 А/Вт (табл. 4.3).

Характеристики η и S_{ph} используют при создании ПРОМ, когда необходимо согласовать последующий каскад электронных усилителей.

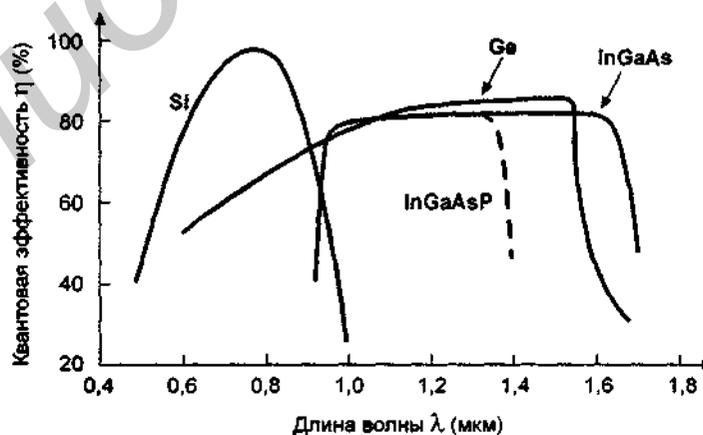


Рис. 4.8. Зависимость квантовой эффективности от длины волны для различных материалов [4]

Темновой ток I_d (А) протекает при обратном смещении через нагрузку в отсутствие падающего на фотодиод излучения. Его величина зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды, конструкции фотоприемника. Максимальные значения этот ток утечки имеет в фотодиодах, изготовленных из германия, и составляет от долей до единиц миллиампера (табл. 4.3). Этот ток добавляется к току полезного сигнала, когда на фотодиод поступает свет.

Для изучения шумовых характеристик приемника используются также еще два шумовых тока: дробовой ток I_{sn} – для р-і-п фотодиода $I_{sn} = (2eI_d B)^{1/2}$, где e – заряд электрона, I_d – темновой ток, B – полоса пропускания (частота модуляции); и тепловой Джонсоновский ток I_{jn} , $I_{jn} = (4КТВ/R)^{1/2}$, где K – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹), T – абсолютная температура (К), B – полоса пропускания, R – сопротивление (Ом), [7]. Полный шумовой ток I_n определяется, как среднее квадратичное дробового и теплового токов $I_n = (I_{sn}^2 + I_{jn}^2)^{1/2}$.

Время нарастания τ_{rise} (спада τ_{fall}) – это самая важная динамическая характеристика фотоприемника. Она определяется как время, необходимое выходному сигналу, чтобы возрасти от уровня 0,1 до 0,9 (упасть от 0,9 до 0,1) от установившегося максимального значения при условии, что на вход подаются строго прямоугольные импульсы света большой длительности. Эти времена зависят от геометрии фотодиода, материала, напряженности электрического поля в слаболегированной области, температуры. Максимальная из двух величин (обычно τ_{rise}) берется в качестве характеристики времени отклика фотоприемника. С увеличением частоты модуляции входных оптических импульсов максимальное значение фототока уменьшается. Предельная частота определяется как частота модуляции, при которой токовая чувствительность составляет 0,707 от значения токовой чувствительности при низких частотах модуляции.

Если внутренние задержки прямо не влияют на полосу пропускания или скорость передачи, то времена нарастания и спада главным образом определяют полосу пропускания. Различные фотоприемники могут очень сильно отличаться по быстродействию (табл. 4.3). Наиболее быстрыми являются р-і-п фотодиоды. У лавинных фотодиодов увеличение коэффициента умножения сопровождается уменьшением быстродействия по сравнению с р-і-п фотодиодами. Наиболее медленными являются фототранзисторы.

Таблица 4.3. Типовые характеристики фотоприемников

Фотоприемник	Токовая чувствительность, А/Вт	Темновой ток, нА	Время нарастания, нс
р-і-п фотодиод (InGaAs)	0,8	0,1-3	0,01-5
р-і-п фотодиод (Si)	0,5	10	0,1-5
Лавинный фотодиод (InGaAs)	20-60	30	0,3
Лавинный фотодиод (Ge)	20-60	400	0,3-1
Фототранзистор (Si)	18	25	2500

Эквивалентная мощность шума P_n (Вт) – это одна из наиболее важных характеристик, учитывающих шумовые свойства фотоприемников. Она определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприемника, при которой отношение сигнал/шум равно единице, и вычисляются по формуле $P_n = I_n^2 / S_{ph}$, где I_n – полный шумовой ток. По определению, эквивалентная мощность шума пропорциональна квадратному корню из полосы пропускания. P_n можно пронормировать, поделив на \sqrt{B} . Такая нормированная эквивалентная мощность шума имеет размерность Вт/Гц^{1/2} и не зависит от полосы пропускания.

Например, если фотодиод имеет темновой ток 2 нА, дробовое сопротивление $R = 5 \cdot 10^8$ Ом, токовую чувствительность $S_{ph} = 0,5$ А/Вт, и полную полосу пропускания $B = 1$ Гц, то дро-

бтовой ток $I_{sn} = 2,5 \cdot 10^{-14}$ А, тепловой ток $I_{jn} = 5,6 \cdot 10^{-15}$ А, полный шумовой ток $I_n = 2,6 \cdot 10^{-14}$ А, и эквивалентная мощность шума $P_n = 5,1 \cdot 10^{-14}$ Вт.

В фотоприемниках, применяющихся в ВОЛС, имеет место доминирование дробового тока над тепловым, это связано с тем, что на фотоприемник подается обратное смещенное напряжение, приводящее к темновому току, который, в свою очередь, влияет на дробовой ток. Только при нулевом напряжении смещения темновой и, следовательно, дробовой токи отсутствуют.

Главная функция фотоприемника – это как можно более точное воспроизведение оптического сигнала, получаемого из волокна. Две фундаментальные характеристики влияют на то, как хорошо фотоприемник справляется с этой задачей: амплитуда входного сигнала и уровень шумов.

Соотношение сигнал/шум и чувствительность аналоговых систем. Для аналоговых систем отношение сигнал/шум измеряется количественно. На практике приемлемое соотношение сигнал/шум зависит от приложения – для одних хорошим соотношением может быть величина 50-60 дБ, для других 30 дБ. Зная P_n и требования к отношению сигнал/шум, можно определить минимальный входной сигнал P_{n_min} – чувствительность аналогового ПРОМ, при котором вносимые искажения и шумы будут в пределах нормы. Этот параметр указывается производителями для фотоприемников при поставке сетевого оборудования с вполне определенной областью приложения. Если входной сигнал ниже чувствительности приемника, то соотношение сигнал/шум может быть не достаточно большим, чтобы корректно выполнялось данное приложение. Принятой единицей измерения чувствительности фотоприемников, также как мощности излучения у светоизлучающих диодов, является дБм.

Частота появления ошибок и чувствительность цифровых систем. В цифровых системах, когда информация передается битами, мерой качества принятого сигнала является вероятность некорректной передачи 0 или 1, которая называется частотой появления ошибок BER. Она определяется как отношение неправильно принятых битов к полному числу принятых битов. Частота появления ошибок очень резко зависит от мощности входного сигнала, рис. 4.9.

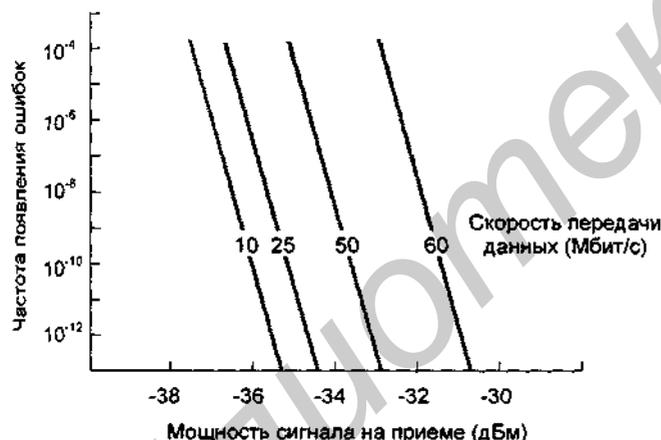


Рис. 4.9. Частота появления ошибок как функция мощности

В определенном диапазоне уменьшение на 5 дБ амплитуды входного сигнала приводит к увеличению BER с 10^{-12} до 10^{-3} . Удовлетворительное значение BER, также как и соотношение сигнал/шум, может быть разным для разных приложений. В цифровых системах, применяемых для нужд телекоммуникаций, BER должна быть не больше 10^{-9} . В вычислительных сетях требования к BER более высокие 10^{-12} . BER зависит от скорости передачи – чем меньше скорость передачи, тем меньше BER.

Чувствительностью цифрового ПРОМ называется минимальная мощность входного сигнала, при которой BER не выходит за рамки максимального допустимого значения,

установленного для данного приложения. Для нормальной работы приложения мощность входного оптического сигнала должна быть не меньше чувствительности ПРОМ. Чувствительность цифровых приемников также принято измерять в дБм.

Насыщение ПРОМ. В аналоговых ПРОМ каскад электронных усилителей имеет участок линейного усиления, что означает линейную зависимость амплитуды выходного электрического сигнала от входной оптической мощности. Это справедливо до тех пор, пока входной сигнал не превышает определенного значения, которое называется насыщением ПРОМ. В цифровых ПРОМ работа каскада усилителей в нелинейной области не столь опасна, однако при больших входных оптических сигналах могут проявляться "хвосты" фототока, остающиеся даже тогда, когда на фотоприемник уже не подается сигнал. В такой ситуации нулевой сигнал на входе, следующий непосредственно за единицей, может неправильно интерпретироваться,

что приводит к росту частоты появления ошибок. Насыщением цифрового ПРОМ называется максимальная входная мощность, выше которого BER начинает превосходить максимально допустимую величину для данного приложения.

Диапазон значений мощности от чувствительности до насыщения ПРОМ называется *динамическим диапазоном ПРОМ*.

Максимально допустимое обратное напряжение U_r – это напряжение, превышение которого может привести к пробою фотоприемника и его разрушению. Наряду с этим значением или вместо него изготовители фотоприемников могут указывать просто обратное рабочее напряжение. Если выбрать меньшее значение рабочего напряжения, то будет ограничена область линейной характеристики фотоприемника.

Рабочий диапазон температур ($^{\circ}\text{C}$). Есть две характеристики, на которые сильно влияет изменение рабочей температуры фотоприемника.

Во первых, это квантовая эффективность, которая может вести себя в общем случае довольно сложным образом с изменением температуры. Например, на рис. 4.10 а показана зависимость квантовой эффективности фотодиода на основе кремния. По горизонтальной оси отложена длина волны падающих фотонов, по вертикальной – относительное процентное изменение квантовой эффективности при увеличении температуры на 1 градус. Из рисунка видно, что если длина волны меньше 600 нм, то с ростом температуры квантовая эффективность падает, а при $\lambda > 600$ нм квантовая эффективность увеличивается с ростом температуры.

Во вторых, рост температуры приводит к экспоненциальному росту термических возбужденных электронно-дырочных пар, в результате чего также экспоненциально возрастает темновой ток, рис. 4.10 б. Утечка тока удваивается при повышении температуры на 8-10 $^{\circ}\text{C}$.

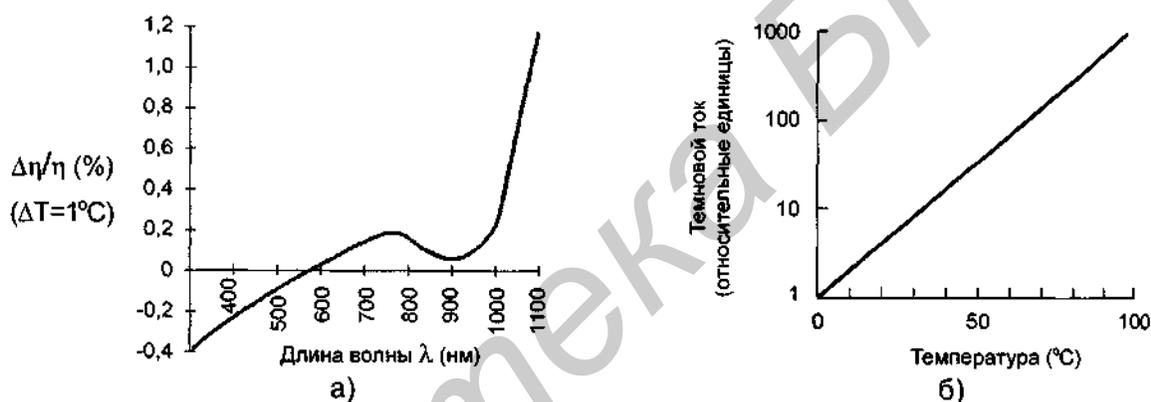


Рис. 4.10. Температурные зависимости квантовой эффективности и темнового тока: а) относительное изменение квантовой эффективности при изменении температуры на 1 $^{\circ}\text{C}$ для разных длин волн; б) зависимость темнового тока от температуры

Наработка на отказ (тыс. часов). При правильной эксплуатации ресурс фотоприемников значительно выше, чем у светоизлучающих диодов.

Лавинный фотодиод

Принцип работы. Главным отличием лавинного фотодиода (ЛФД) от обычного фотодиода является внутреннее усиление сигнала, базируемое на лавинном электронном умножении сигнала. Если структура слоев у обычного фотодиода имеет вид $p^+ - i - n^+$, то у ЛФД добавляется p -слой ($p^+ - i - p - n^+$), рис. 4.7 б. Причем профиль распределения легирующих примесей выбирается так, чтобы наибольшее сопротивление, а следовательно, и наибольшую напряженность электрического поля имел p -слой. При воздействии света на i -слой образуются электронно-дырочные пары. Благодаря небольшому полю, происходит направленное движение носителей к соответствующим полюсам. При попадании свободных электронов из i -слоя в p -слой их ускорение становится более ощутимым из-за высокого электрического поля в p -слое. Ускоряясь в зоне проводимости p -слоя, такие электроны накапливают энергию достаточную,

чтобы выбить (возбудить) другие электроны из валентной зоны в зону проводимости. Этот процесс носит название лавинного усиления или умножения первичного фототока. Коэффициент умножения составляет несколько десятков, поэтому токовая чувствительность ЛФД значительно выше токовой чувствительности р-і-п фотодиодов. Коэффициент умножения M определяется по эмпирической формуле $M = 1 / (1 - (U/U_b)^n)$, где U – напряжение внешнего обратного смещения, U_b – напряжение обратного смещения, при котором наступает электри-

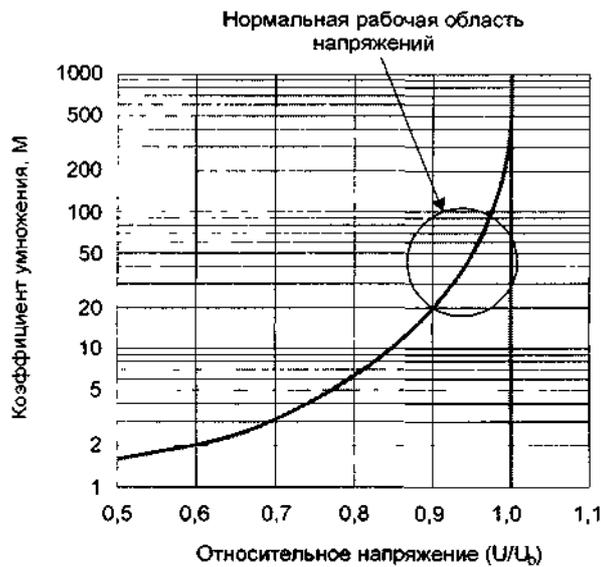


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента умножения лавинного фотодиода от рабочего напряжения обратного смещения

ческий пробой (breakdown) фотодиода – обычно это напряжение порядка 100 В, но может достигать в некоторых устройствах нескольких сот вольт, n – число в диапазоне от 3 до 6, рис. 4.11.

ЛФД имеют высокое быстродействие, однако случайная природа лавинного тока приводит к шуму. В отличие от полезного сигнала, который усиливается пропорционально M , шум усиливается быстрее (приблизительно как $M^{2,1}$). В результате этого выбирается оптимальное значение коэффициента умножения M , обычно в пределах от 30 до 100.

Особенностью работы ЛФД являются более высокое рабочее напряжение по сравнению с р-і-п фотодиодами и повышенная температурная чувствительность коэффициента умножения. Это требует использования специальной электрической цепи, вырабатывающей необходимое рабочее напряжение, а также системы термостабилизации.

Электронные элементы ПРОМ

Выходящий электрический сигнал от фотоприемника усиливается каскадом электронных усилителей и, возможно, испытывает определенную обработку. Основные функции, которые выполняет ПРОМ на этом этапе: электронное предусиление и усиление, выравнивание, фильтрация, дискриминация, синхронизация и работа таймера.

Электронное предусиление и усиление. Типовое значение оптического сигнала на входе фотоприемника составляет 1-10 мкВт, а иногда и меньше. Если такой сигнал обрабатывается р-і-п фотодиодом с токовой чувствительностью от 0,6 до 0,8 А/Вт, то выходной ток составит несколько микроампер, и необходимо последующее его усиление. Допускается одна или несколько стадий усиления. Обычно усилитель на первой стадии называется предусилителем. Его особенностью является низкий уровень вносимых шумов. Далее следует усилитель мощности.

Выравнивание. Прием и усиление сигнала может несколько изменять обрабатываемый сигнал. Например, каскад электронных усилителей, принимающий широкополосный аналоговый сигнал, может иметь разный коэффициент усиления для высоких и низких частот. Чтобы восстановить правильное соотношение амплитуд в низкой и высокой областях спектра, необходимо добавить цепь выравнивания сигнала.

Фильтрация позволяет увеличить соотношение сигнал/шум посредством избирательного (в определенных диапазонах частот) подавления шума. Часто, таким образом, можно подавить высокочастотные гармоники шума, заведомо зная, что полезный сигнал не распространяется в этой области спектра.

Дискриминация. Если предыдущие три функции в равной степени могли относиться как при обработке аналогового сигнала, так и цифрового, то функция дискриминации применяется только при обработке цифровых сигналов. Из-за наличия дисперсии при распространении света по волокну входящие фронты импульсов могут потерять первоначальную прямоугольную форму и стать размытыми. Необходимо восстановить их прямоугольную форму. Для этой

цели предназначена цепь принятия решения или дискриминатор, который имеет порог срабатывания. Если амплитуда поступающего на дискриминатор сигнала меньше порога, то на выходе сигнала нет (0), если же превосходит порог, то на выходе идет сигнал определенной амплитуды (1). Главным недостатком такой регенерации цифрового сигнала является допустимость нарушения длительности импульсов. Чем меньше амплитуда поступающего на дискриминатор сигнала, тем короче могут быть импульсы, соответствующие единичному сигналу на выходе дискриминатора. Низкое значение порога также не желательно, поскольку можно ошибочно принять шум за полезный сигнал.

Для того, чтобы строго сохранялась длительность импульсов на выходе дискриминатора, необходимо, чтобы дискриминатор получал информацию о частоте, с которой должны следовать импульсы.

Работа таймера. Основная функция таймера – это подавление ресинхронизации сигнала. Традиционный цифровой сигнал генерируется на характерной частоте, например, 1 раз в микросекунду. По мере передачи и ретрансляции сигнала случайные временные ошибки могут накапливаться и достигать уровня, сравнимого с длительностью самого импульса. В результате приемник ошибочно может интерпретировать принятый бит или "потерять" бит. Такие случайные временные ошибки получили название *джитер* (jitter, дрожание). Их появление характерно при синхронном режиме передачи. Уменьшить джитер можно, повысив требования к стандарту частоты генератора импульсов. Однако если приемник имеет свой собственный таймер, то при длительном приеме будут проскакивать ошибки вследствие наличия джитера. Дальнейшее уменьшение ошибок из-за джитера достигается в более продвинутой технологии магистральных оптических сетей, основанных на так называемой синхронной цифровой иерархии SDH. В SDH при синхронной передаче в битовом потоке наряду с полезной информацией присутствуют специальные синхроимпульсы, по которым настраивается (плавно пере-страивается под частоту передатчика) таймер приемника. В сложной сети SDH существует один независимый ведущий таймер (master clock), на который равняются другие устройства сети.

Поставщики. Крупными поставщиками ПРОМ являются фирмы: Epitaxx Inc., Hamamatsu Corp., Hewlett-Packard, Hitachi, Honeywell Inc., Lasertron Inc., Laser Diode Inc., NEC Electronics Inc., OKI Semiconductors, Optek Technology Inc., Optical Communication Product Inc., Ortel Corp., Siemens Corp., Sumitomo Electric Industries Ltd., Toshiba и др. [5].

4.3. Повторители и оптические усилители

Проблема расстояния

По мере распространения оптического сигнала происходит его ослабление, а также уширение импульсов из-за дисперсии. Любой из этих факторов может оказаться причиной ограничения максимальной длины безретрансляционного участка волоконно-оптического сегмента. Если же максимальная допустимая длина между приемником и передатчиком превышена, то необходимо в промежуточных точках линии связи добавлять один или несколько ретрансляторов. В общем случае, ретранслятор выполняет функцию усиления оптического сигнала, и дополнительно (при цифровой передаче) может восстанавливать форму импульсов, уменьшать уровень шумов и устранять ошибки – такой ретранслятор называется *регенератором*.

Типы ретрансляторов

По методу усиления оптического сигнала ретрансляторы подразделяются на две категории: повторители и оптические усилители.

В волоконно-оптических системах локальных сетей повторители значительно больше распространены, чем оптические усилители, в то время как при построении оптических магистралей оптические усилители играют незаменимую роль.

Повторитель (электронно-оптический повторитель) сначала преобразует оптический сигнал в электрическую форму, усиливает, корректирует, а затем преобразовывает обратно в оптический сигнал, рис. 4.12 а. Можно представить повторитель как последовательно соединенные приемный и передающий оптические модули. Аналоговый повторитель, в основном, выполняет функцию усиления сигнала. При этом вместе с полезным сигналом усиливается также входной шум. Однако при цифровой передаче повторитель наряду с функцией усиления

может выполнять функцию регенерации сигнала, свойственную цифровому оптическому приемнику, рис. 4.6 б. Обычно блок регенерации охватывает цепь принятия решения и таймер. Блок регенерации восстанавливает прямоугольную форму импульсов, устраняет шум, ресинхронизирует передачу так, чтобы выходные импульсы попадали в соответствующие тайм-слоты. Повторитель может и не содержать таймера и восстанавливать прямоугольную форму импульсов по определенному порогу, независимо от того, на какой скорости ведется передача. Такие "среднезависимые" повторители применяются в локальных сетях, где имеет место асинхронный режим передачи.

Оптический усилитель (ОУ), в отличие от повторителя, не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а сразу производит усиление оптического сигнала, рис. 4.12 б. Оптические усилители не способны в принципе производить регенерацию оптического сигнала. Они в равной степени усиливают как входной сигнал, так и шум. Кроме этого, вносится собственный шум в выходной оптический канал.

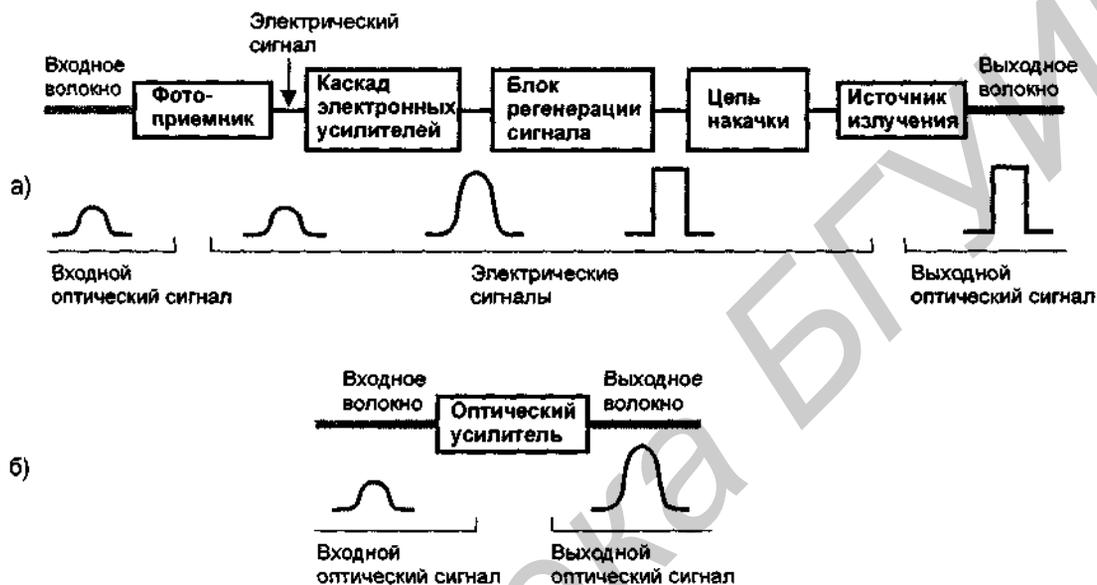


Рис. 4.12. Типы ретрансляторов: а) электронно-оптический повторитель; б) оптический усилитель

Сравнительные характеристики повторителя и оптического усилителя приведены в табл. 4.4. Концептуальная простота – один из притягивающих факторов ОУ. Простота конструкции, в которой преобладают пассивные компоненты, в конечном счете обещает низкую цену, так как число компонентов ОУ значительно меньше, чем у повторителя. На практике, однако, цена ОУ значительно выше, чем у повторителей. Но, по прогнозам специалистов, цена ОУ по мере увеличения рынка продаж будет падать. ОУ имеет более высокую надежность, чем повторитель. Это важное преимущество при создании ретрансляторов при прокладке подводного ВОК. ОУ не привязан к скорости передачи, в то время как повторитель обычно исполняется для работы на определенной скорости. Именно на эту скорость конфигурируется таймер повторителя.

Повторитель работает с одним сигналом. ОУ может одновременно усиливать несколько оптических сигналов, представленных несколькими длинами волн (WDM сигнал) в пределах определенного интервала, который называется зоной усиления. Это позволяет наращивать пропускную способность линии связи, на которой установлены ОУ, без добавления новых волокон.

Повторители для цифровых линий связи

Хотя повторители для цифровых линий связи могут быть независимыми от среды, большинство из них рассчитано на вполне определенный стандарт. В локальных сетях распространены повторители, преобразующие сигналы из многомодового (mm) в одномодовое

(sm) волокно. Такие повторители получили название *конвертеры*. Широко распространены FDDI (100 Мбит/с) [8, 9], ATM (155 Мбит/с), ATM (622 Мбит/с) [10] sm/mm конвертеры.

Таблица 4.4. Сравнительные характеристики повторителей и оптических усилителей

Характеристика	Повторитель	Оптический усилитель
Конструкция	Сложная	Простая
Цена	Низкая	Высокая, но падает
Надежность	Высокая	Очень высокая
Регенерация сигнала	Допустима	Исключена
Привязка к скорости передачи	Требуется	Не требуется
Возможность одновременной передачи нескольких сигналов	Не допускается	Допускается
Рабочая длина волны, нм	850, 1300, 1550	Область 1530-1560
Отношение сигнал шум	Высокое	Низкое
Область применения	Локальные сети, региональные сети, межрегиональные сети	Сейчас и в перспективе региональные сети, межрегиональные сети

Оптические усилители

Эти устройства обеспечивают внутреннее усиление оптического сигнала без его преобразования в электрическую форму. Они используют принцип индуцированного излучения, аналогично лазерам. Существует пять типов оптических усилителей, см. табл. 4.5 [4].

Таблица 4.5. Типы и области применения оптических усилителей

№	Типы усилителей	Область применения
1	Усилитель с полостью Фабри-Перо	Усиление одного канала (одной длины волны)
2	Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние	Усиление одного канала
3	Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние	Усиление нескольких каналов одновременно
4	Полупроводниковые лазерные усилители	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно
5	Усилители на примесном волокне	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно

1. Усилители Фабри-Перо. Усилители оснащаются плоским резонатором с зеркальными полупрозрачными стенками. Они обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 25 дБ) в очень узком (1,5 ГГц), но широко перестраиваемом (800 ГГц) спектральном диапазоне. Кроме этого, эти устройства не чувствительны к поляризации сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами интервала в 5 ГГц). В силу своих характеристик, усилители Фабри-Перо идеально подходят для работы в качестве демультиплексоров, поскольку они могут всегда быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM сигнала.

2. Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние. Стимулированное бриллюэновское рассеяние – это нелинейный эффект, возникающий в кремниевом волокне, когда энергия от оптической волны на частоте, скажем, f_1 переходит в энергию новой волны на смещенной частоте f_2 .

Если мощная накачка производится на частоте f_1 , стимулированное бриллюэновское рассеяние способно усиливать слабый входной сигнал на частоте f_2 . Выходной сигнал сосредоточен в узком диапазоне, что позволяет выбирать канал с погрешностью 1,5 ГГц.

3. Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние. Стимулированное рамановское рассеяние – также нелинейный эффект, который подобно бриллюэновскому рассеянию может использоваться для преобразования части энергии из мощной волны накачки в слабую сигнальную волну. Однако, при рамановском рассеянии частотный сдвиг между сигнальной волной и волной накачки $(f_2 - f_1)$ больше, а выходной спектральный диапазон усиления шире, что допускает усиление сразу нескольких каналов в WDM сигнале. Большие переходные помехи между усиливаемыми каналами представляют основную проблему при разработке таких усилителей.

4. Полупроводниковые лазерные усилители (ППЛУ). Основу ППЛУ составляет активная среда, аналогичная той, которая используется в полупроводниковых лазерах [11, 12]. В ППЛУ отсутствуют зеркальные резонаторы, характерные для полупроводниковых лазеров. Для уменьшения френелевского отражения с обеих сторон активной среды наносится специальное покрытие толщиной $\lambda/4$ с согласованным показателем преломления, рис. 4.13.

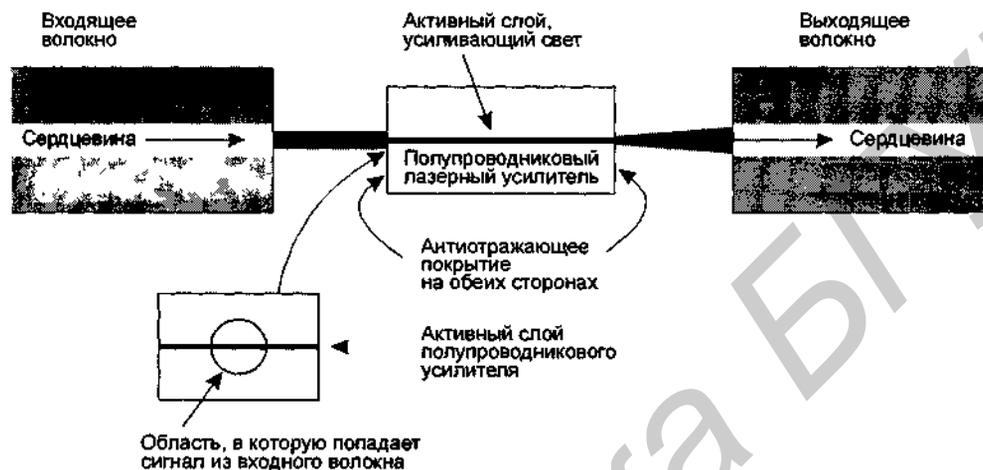


Рис. 4.13. Полупроводниковый лазерный усилитель

Полупроводниковые лазерные усилители не получили столь широкого распространения, как усилители на примесном волокне. Дело в том, что ППЛУ свойственны два существенных недостатка.

Светоизлучающий активный слой имеет поперечный размер несколько микрон, но толщину в пределах одного микрона, что много меньше, чем диаметр светонесущей части оптического волокна (~ 9 мкм – для одномодового волокна). Вследствие этого большая часть светового потока из входящего волокна не попадает в активную область и теряется, что уменьшает КПД усилителя. Увеличить КПД можно, поставив между входящим волокном и активной средой линзу, но это приводит к усложнению конструкции.

Второй недостаток имеет более тонкую природу. Дело в том, что выход (коэффициент усиления) ППЛУ зависит от направления поляризации и может отличаться на 4-8 дБ для двух ортогональных поляризаций. Это нежелательно, так как в стандартном одномодовом волокне поляризация распространяемого светового сигнала не контролируется. Мощность светового потока данной поляризации может флуктуировать вдоль длины. Отсюда вытекает, что коэффициент усиления ППЛУ зависит от неконтролируемого фактора. Можно уменьшить эту зависимость от поляризации путем установки двух лазеров – возможно как параллельное (требуется пара разветвителей), так и последовательное их подключение. Но это снова приводит к усложнению конструкции и росту стоимости.

Два приведенных недостатка нивелируются в тех случаях, когда ППЛУ интегрирован с другими оптическими устройствами. И именно так преимущественно используются ППЛУ. Одна из возможностей – производство совмещенного светоизлучающего лазерного диода, непосредственно на выходе которого устанавливается ППЛУ.

На рис. 4.14 показана еще одна реализация источника мультиплексного многоволнового излучения, в котором ППЛУ используются в качестве широкополосного усилителя. Несколько узкополосных полупроводниковых лазеров на разных длинах волн генерируют световые сиг-

налы, которые мультиплексируются и размножаются посредством оптического разветвителя. ППЛУ устанавливаются на конечном участке, чтобы усилить ослабленные после разветвления оптические мультиплексные сигналы.

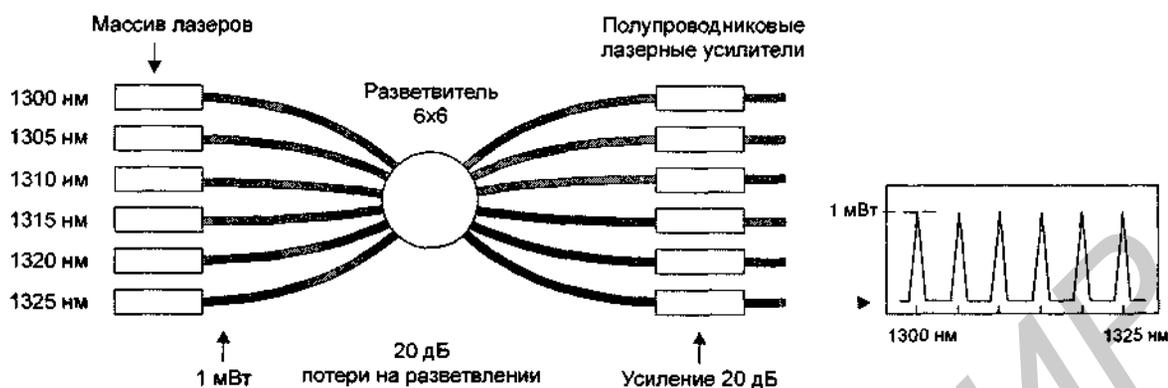


Рис. 4.14. Источник мультиплексного излучения. (полупроводниковые лазерные усилители интегрированы с массивом лазерных светодиодов и оптическим разветвителем)

5. Усилители на примесном волокне. Этот тип оптического усилителя наиболее широко распространен и является ключевым элементом в технологии полностью оптических сетей, поскольку он позволяет усиливать сигнал в широком спектральном диапазоне [13, 14, 15].

На рис. 4.15 приведена схема усилителя на примесном волокне. Слабый входной оптический сигнал (1) проходит через оптический изолятор (2), который пропускает свет в прямом направлении – слева направо, но не пропускает рассеянный свет в обратном направлении, далее проходит через блок фильтров (3), которые блокируют световой поток на длине волны накачки, но прозрачны к длине волны сигнала. Затем сигнал попадает в катушку с волокном, легированным примесью из редкоземельных элементов (4). Длина такого участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению полупроводникового лазера (5), установленного с противоположной стороны, с более короткой длиной волны накачки. Свет от лазера накачки – волна накачки (6) – возбуждает атомы примесей. Возбужденные состояния имеют большое время релаксации, чтобы спонтанно перейти в основное состояние. Однако при наличии слабого сигнала происходит индуцированный переход атомов примесей из возбужденного состояния в основное с излучением света на той же длине волны и с той же самой фазой, что и повлекший это сигнал. Селективный разветвитель (7) перенаправляет усиленный полезный сигнал (8) в выходное волокно (9). Дополнительный оптический изолятор на выходе (10) предотвращает попадание обратного рассеянного сигнала из выходного сегмента в активную область оптического усилителя.

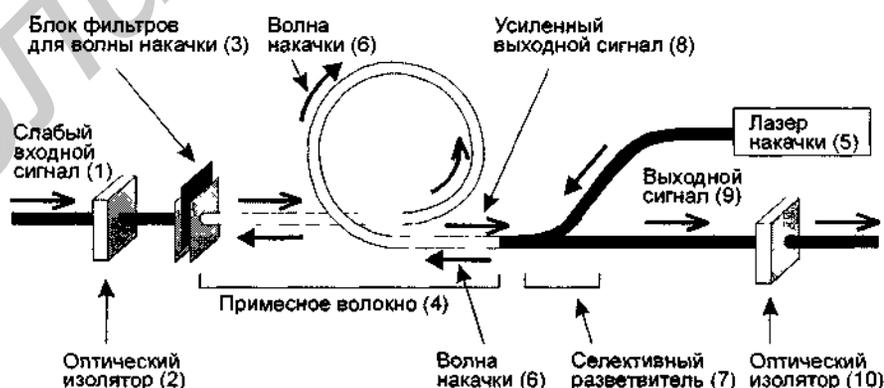


Рис. 4.15. Оптический усилитель на примесном волокне

Активной средой усилителя является одномодовое волокно, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы, рис. 4.16. Лазер накачки возбуждает электронную подсистему примесных атомов. В результате чего электроны с основного состояния (уровень А) переходят в возбужденное состояние (уровень В). Далее происходит релаксация электронов с уровня В на промежуточный уровень С. Когда заселенность уровня С становится достаточно высокой, так что образуется инверсная заселенность уровней А и С, то такая система способна индуцировано усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн. Если же входной сигнал не нулевой, то происходит спонтанное излучение возбужденных атомов примесей, приводящее к шуму.

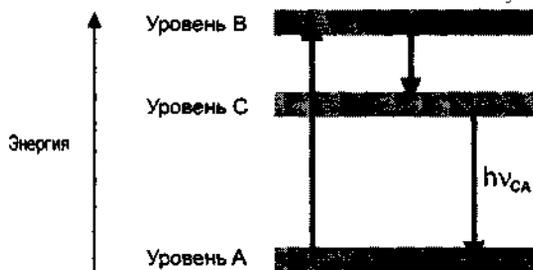


Рис. 4.16. Энергетическая диаграмма уровней атомной системы усилителя на примесном волокне

Особенности работы усилителя во многом зависят от типа примесей и от диапазона длин волн, в пределах которого он должен усиливать сигнал. Наиболее широко распространены усилители, в которых используется кремниевое волокно, легированное эрбием. Такие усилители получили название EDFA. Межатомное взаимодействие является причиной очень важного положительного фактора – уширения уровней, что, в конечном итоге, обеспечивает усилителю широкую зону усиления сигнала [16]. В EDFA наиболее широкая зона усиления от 1530 до 1560 нм, соответствующая переходу $h\nu_{CA}$, достигается при оптимальной длине волны лазера накачки 980 нм.

Усиление в другом окне прозрачности 1300 нм можно реализовать с использованием примесей празеодимия, однако такие оптические усилители не получили большого распространения.

Усиление в другом окне прозрачности 1300 нм можно реализовать с использованием примесей празеодимия, однако такие оптические усилители не получили большого распространения.

Коэффициент усиления сигнала зависит от его входной амплитуды и длины волны. При малых входных сигналах амплитуда выходного сигнала линейно растет с ростом входного сигнала, коэффициент усиления достигает при этом своего максимального значения. Например, если входной сигнал 1 мВт (-30 дБм), то выходной сигнал может быть на уровне 1 мВт (0 дБм), что соответствует усилению в 30 дБ. Но при большом входном сигнале сигнал на выходе достигает своего насыщения, что приводит к падению коэффициента усиления. Например, на той же длине волны входной сигнал 1 мВт приведет к генерации выходного сигнала 20 мВт в режиме насыщения, что будет соответствовать коэффициенту усиления всего лишь 13 дБ.

На рис. 4.17 показано, как ведет себя коэффициент усиления K для EDFA в зависимости от длины волны и при различных значениях мощности входного сигнала. Уменьшение K при $P_{in} = 1$ мВт связано с насыщением усилителя. На кривой зависимости K от длины волны при малых значениях мощности входного сигнала заметны минимумы и максимумы. Отсутствие плато в широком диапазоне длин волн (от 1530 до 1560 нм) заставляет дополнительно на линии из каскада оптических усилителей устанавливать эквалайзеры с целью выравнивания амплитуд мультиплексных сигналов разных длин волн. В то же время ведутся интенсивные исследования по выравниванию кривой усиления. Следует подчеркнуть, что построение усилителей с такими характеристиками не является непреодолимой задачей, но скорее требует тщательно отработанной технологии производства всех элементов усилителя.

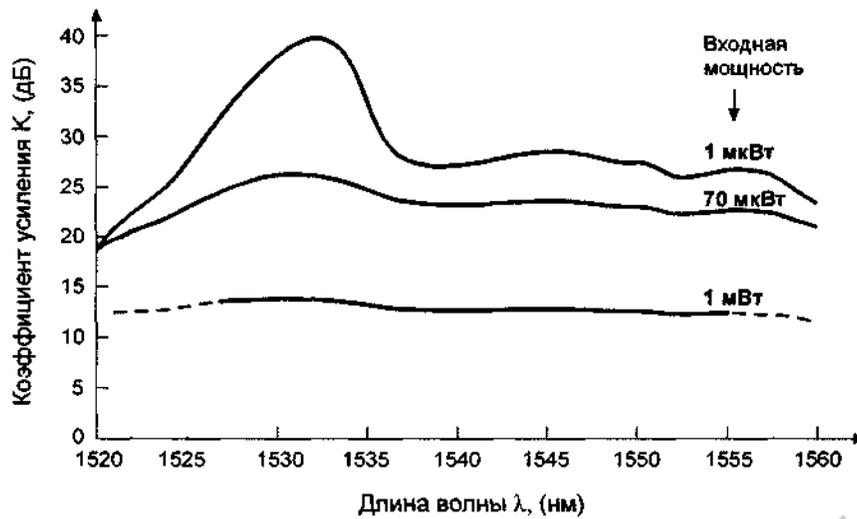


Рис. 4.17. Коэффициент усиления кремниевого EDFA при различных значениях мощности входного оптического сигнала (по материалам фирмы Corning)

Характерным для оптических усилителей является широкополосный собственный шум, рис. 4.18. Этот шум, которого избежать невозможно, главным образом связан со спонтанным излучением инверсно-заселенных уровней на примесных атомах.

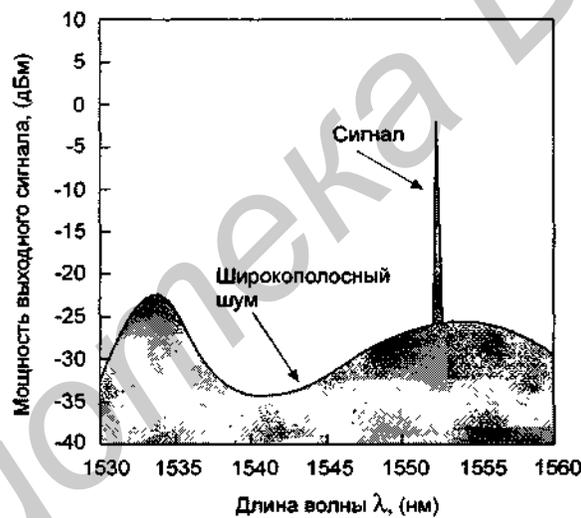


Рис. 4.18. Мощность выходного сигнала и шума в EDFA

4.4. Разновидности усилителей EDFA

Две разновидности усилителей EDFA с примесным волокном преобладают в коммерческих реализациях сегодня: на кремниевой основе, и на фтор-цирконатной основе [14]. При очень схожем внутреннем строении эти усилители отличаются только заготовочным волокном.

Усилители EDFA на кремниевой основе первыми появились на рынке и определили развитие благодаря возможности усиления WDM сигнала в широком спектральном интервале при небольших вносимых шумах на разных длинах волн. Сегодня оба типа усилителей (кремниевые и фтор-цирконатные) способны работать во всем диапазоне выхода оптического излучения эрбия от 1530 нм до 1560 нм. Однако оптические усилители на кремниевой основе не имеют столь ровной передаточной кривой коэффициента усиления, как усилители на фтор-цирконатной основе, рис. 4.19.

В силу особенностей конструкции усилители EDFA вносят определенный шум в усиленный сигнал, приводя к уменьшению соотношения сигнал/шум и ограничивая число каскадов и расстояние между двумя электронными регенераторами.

Этот недостаток не помешал дальнейшему стремительному развитию технологии и серийного производства усилителей EDFA. Четырехволновое мультиплексирование в окне 1550 нм, появившееся всего несколько лет назад, сегодня сменяется мультиплексными системами с числом волновых каналов более 40. Плата за увеличение числа каналов выражается в уменьшении удельной мощности (мощности на канал) в выходном сигнале, которая ослабевает примерно на 3 дБ при удвоении числа каналов.

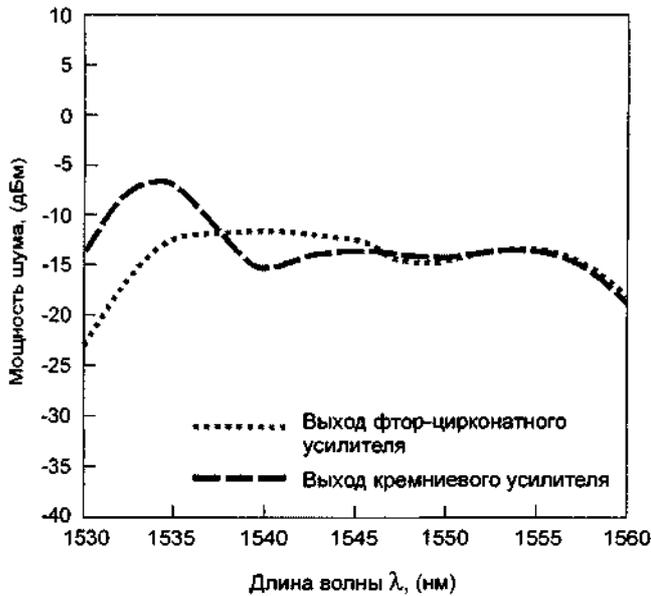


Рис. 4.19. Кривая выходной мощности, представляющей собой мощность входного шума, при отсутствии сигнала на входе

коэффициента усиления как функции длины волны. На рис. 4.20 а показана кривая выходной мощности при усилении 16-канального мультиплексного сигнала со скоростью на канал STM-16 (2,5 Гбит/с). Как видно, на некоторых каналах сохраняется довольно высокое отношение сигнал/шум (SNR), в то время как на других, особенно в районе 1540 нм, значение SNR низкое. В результате может оказаться, что DWDM сигнал, проходящий через усилитель на одних каналах (например, выше 1545 нм) будет иметь приемлемое SNR, а на других (район 1540 нм) не удовлетворительное для используемого приложения соотношение SNR.

Усилители на кремниевой основе

Усиление DWDM сигнала в традиционных усилителях на кремниевом волокне связано с одной технологической проблемой – нерегулярностью коэффициента

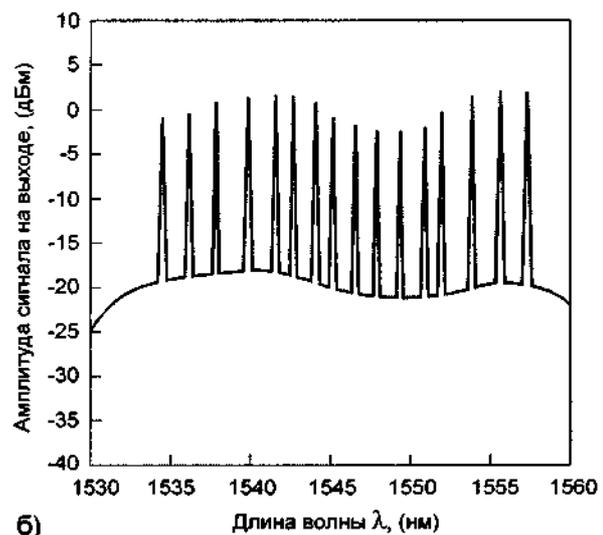
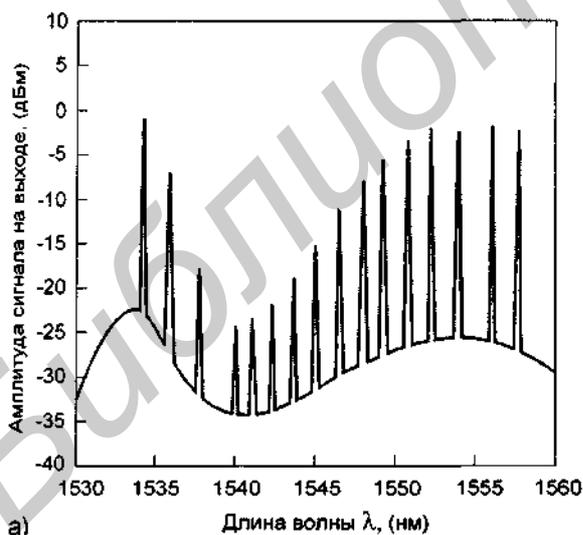


Рис. 4.20. Кривые выходной мощности (сигнала и шума) при поступлении на вход усилителя DWDM сигнала для усилителей: а) на кремниевой основе (наблюдается завал в окрестности 1540 нм); б) на фтор-цирконатной основе

В результате того, что признание технологии усилителей EDFA на кремниевой основе произошло раньше, на сегодняшний день большее распространение имеет именно эти разновидности EDFA. Некоторые потребители (операторы связи) решают проблему завала кри-вой простым исключением области низкого усиления от 1530 до 1542 нм, довольствуясь бо-лее узким окном. Но это может повлечь в некоторых случаях к очень высокой плотности кана-лов, что нежелательно, так как с ростом плотности сильнее начинают проявляться нелиней-ные эффекты, как, например, четырехволновое смешивание. Кроме этого, принимая во вни-мание настоящее состояние дел по технологии фильтрации, стоимость выделения отдельных каналов из более плотного DWDM сигнала будет выше.

Другой способ решения проблемы завала состоит в намеренном предварительном се-лективном ослаблении входного сигнала с целью получения более ровной картины амплитуд выходных сигналов и более согласованных значений SNR на разных каналах. При выполнении селективного ослабления приходится принимать во внимание то, что энергия на других кана-лах также перераспределяется. В результате чего оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой. Дополнительные сложности возникают, когда битовые скорости добавляемых или удаляемых каналов различны. Например, соотношение SNR для передачи STM-64 (10 Гбит/с) должно быть на 6 дБ больше, чем для передачи STM-16 (2,5 Гбит/с) В последнем случае, дополнительная мощность должна быть добавлена в канал STM-64.

Производители оборудования, понимая эту проблему, начинают внедрять различные самооптимизирующиеся алгоритмы в элементы полностью оптической сети [17, 18]. Обеспе-чение возможности динамического оптического балансирования по энергии между каналами важно не только для работы с EDFA на кремниевой основе, но и само по себе, поскольку по-зволяет значительно повысить надежность сети.

Усилители на фтор-цирконатной основе

Эти усилители обладают более регулярным плато. Дело в том, что фторсодержащее волокно способно поглотить больше эрбия, что и приводит к улучшению профиля в области 1530-1542 нм, которая теперь открывается для усиления DWDM сигнала.

Рис. 4.20 б показывает, насколько эффективно усиливается DWDM сигнал. Мультиплек-сированные каналы практически по всей полосе пропускания имеют близкие значения SNR. Это значительно упрощает процедуру оптического балансирования при воспроизведении сиг-налов, когда каналы добавляются или удаляются.

Фтор-цирконатный усилитель EDFA имеет один недостаток – выше (чем у кремниевого) уровень шума, что является следствием большей рабочей длины волны лазера накачки 1480 нм. Дело в том, что длина волны накачки 980 нм, характерная для кремниевого EDFA, не эф-фективна для работы флюоридного усилителя EDFA, поскольку на этой длине волны велико сечение поглощения, сопровождающееся возбуждением других состояний. Указанный недос-таток проявляется при строительстве сверхпротяженных безрегенерационных сегментов с каскадом оптических усилителей, ограничивая расстояния между усилителями. Есть пути пре-одоления этой проблемы, и производители собираются поставлять следующее поколение фтор-цирконатных усилителей EDFA, имеющих ровный профиль, низкий уровень шумов и бо-лее высокую надежность.

Литература к главе 4

1. Волоконно-оптические системы связи на ГТС: Справочник / Б. З. Берлин, А. С. Брискер, В. С. Иванов – М.: Радио и связь, 1994. – 160 с.
2. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник / И. И. Гроднев, А. Г. Мурадян, Р. М. Щарафутдинов и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 264 с.
3. K. Vilhelmsson. Continuously Tunable External-Cavity Semiconductor Laser, Radians Innova AB, Box 14194, S – 400 20 Goteborg, Sweden, 1996. – 2 p., <http://www.radians.se/laser/extprin.html>
4. J. Hecht. Understanding Fiber Optics, Sams Publishing, 1993. – 477 p.
5. Ronald Shamus. "Optoelectronic Components", EE535 Homework 5, 1996, <http://bugs.wpi.edu:8080/EE535/hwk96/hwk5cd96/rshamus/rshamus.html>
6. F. Halsall. Data Communications, Computer Networks and Open Systems, Addison-Wesley, 1996. – 907 p.
7. The Johnson-Nyquist Formula, 1998, <http://www.tip.csiro.au/~fgreen/jnyq2.html>

5. Сети передачи данных

5.1. Мультиплексирование

В локальных и особенно в протяженных сетях емкости магистральных линий связи обычно значительно превышают емкости передач отдельных приложений. Это делается с целью одновременной передачи множества таких приложений. Дополнительно, сами приложения могут иметь разную природу, например, это может быть передача постоянного битового потока или передача файлов данных. С целью повышения эффективности передающей среды (носителя) и ее адаптации под множество разнородных приложений применяется передача одновременно сразу нескольких информационных сигналов в одном носителе – мультиплексирование.

Различают два основных вида мультиплексирования:

- *Частотное мультиплексирование*¹ FDM: каждому сигналу отводится определенная доля всей частотной полосы носителя, так что на одном носителе существуют одновременно сразу несколько сигналов.
- *Временное мультиплексирование*² TDM: сигналу каждого приложения выделяется вся полоса носителя, но на короткий промежуток времени – тайм-слот, так что мультиплексный сигнал представляется в виде последовательности сменяющих друг друга тайм-слотов, ответственных за разные приложения. В рамках TDM различают *синхронное* мультиплексирование (каждому приложению соответствует тайм-слот (возможно несколько тайм-слотов) с определенным порядковым номером в периодической последовательности слотов, и *асинхронное* или *статистическое* мультиплексирование, когда приписывание тайм-слотов приложениям происходит более свободным образом, например, по требованию.

На рис. 5.1 показаны схемы размещения каналов при FDM и TDM. Устройство, принимающее несколько каналов от разных приложений (например, голос, видео, данные) и передающее их в виде мультиплексного сигнала на одном носителе, называется *мультиплексором* MUX, а устройство, выполняющее обратную функцию на другом конце – *демультиплексором* DEMUX. Обычно в системах двунаправленной связи функции мультиплексирования и демультиплексирования совмещаются в одном устройстве, которое также называется мультиплексором

Частотное мультиплексирование FDM

Частотное мультиплексирование (рис. 5.1 а) распространено в системах беспроводной радиосвязи, в мобильных телефонных системах, в абонентских телевизионных системах, включая кабельное телевидение и телефонию. Каналы, представленные в мультиплексном сигнале, могут быть как аналоговыми, так и цифровыми.

В сетях широковещательного телевидения сначала исходные низкочастотные телевизионные сигналы от передающих устройств смещаются посредством модуляции в определенные, отведенные специально для них области спектра – каждой области отводится полоса 6,5 МГц. Затем такой мультиплексный широкополосный сигнал (до 860 МГц) распространяется по эфиру или в коаксиальной кабельной системе от локальных студий кабельного телевидения к абонентам.

Разновидностью FDM является волновое мультиплексирование WDM, применяемое в волоконно-оптических системах передач. Преимущественно используется область спектра от 1,3 нм (230 ТГц) до 1,6 нм (188 ТГц). Для плотного волнового мультиплексирования используется область спектра 1530-1560 нм.

Синхронное временное мультиплексирование

Синхронное мультиплексирование объединяет n низкоскоростных цифровых каналов (или n периодически повторяющихся равных по длительности тайм-слотов) внутри одного носителя. С целью лучшей синхронизации непрерывного битового потока, в мультиплексорах используются таймеры с высоким стандартом частоты. На рис. 5.1 б показана схема следова-

¹ Также используется термин мультиплексирование с частотным уплотнением.

² Также используется термин мультиплексирование с разделением времени.

ния тайм-слотов при 12-канальном TDM. Тайм-слоты с номером 1 соответствуют первому приложению, с номером 2 – второму и т.д. Емкость отдельного приложения – емкость тайм-слота – равна W/n , где W – полная полоса носителя. Емкие приложения могут занимать полосу в несколько тайм-слотов.

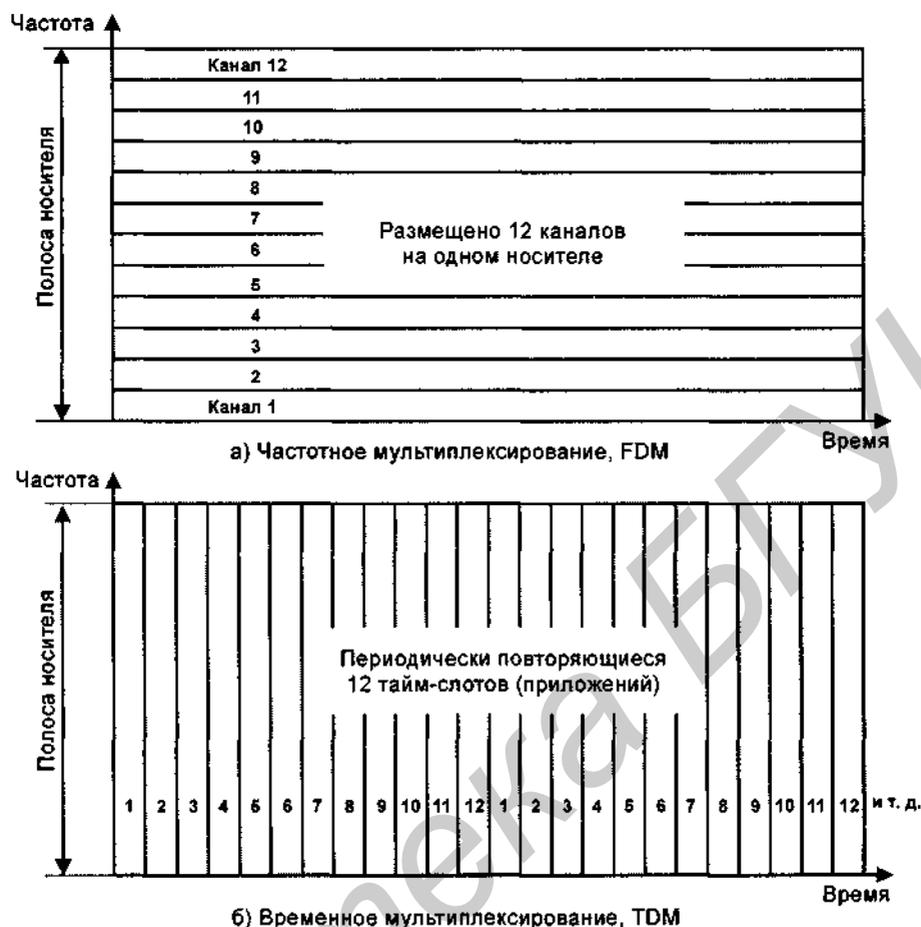


Рис. 5.1. Основные виды мультиплексирования

Если от одного из приложений не поступают данные, мультиплексор не сбрасывает тайм-слоты этого приложения в скоростном канале и оставляет для него прежнюю полосу W/n . Никакому другому приложению эта полоса не доступна. Более того, ни одно из приложений не может получить большую полосу пропускания, чем та, которая отводится. Это – особенность синхронного мультиплексирования.

Мультиплексирование может происходить на октетном, битовом или кадровом уровне.

При мультиплексировании на октетном уровне последовательности в 8 битов от каждого из n приложений – октеты – циклически сменяют друг друга. Задержка на время буферизации одного октета возникает между входным низкоскоростным и выходным мультиплексным потоками.

При мультиплексировании на битовом уровне происходит побитовое смешивание входных потоков. Более критичными, в этом случае, становятся требования к временным характеристикам, но и уменьшается задержка, вносимая мультиплексором. В городских коммутируемых телефонных сетях мультиплексирование на битовом уровне используется при построении скоростных мультиплексных каналов.

При мультиплексировании на кадровом уровне кадры (специальные битовые последовательности с заголовком, сигнальными полями и полями данных) из входных низкоскоростных

каналов смешиваются в выходном мультиплексном канале. Этот вид мультиплексирования характерен при построении асинхронных мультиплексоров.

Логическая топология определяет характер движения данных в мультиплексном канале. Три основных типа логической топологии могут иметь синхронные мультиплексные системы: соединение "точка-точка", *цепное соединение* и *кольцевое соединение*, рис. 5.2. Допускаются более сложные смешанные логические топологии.

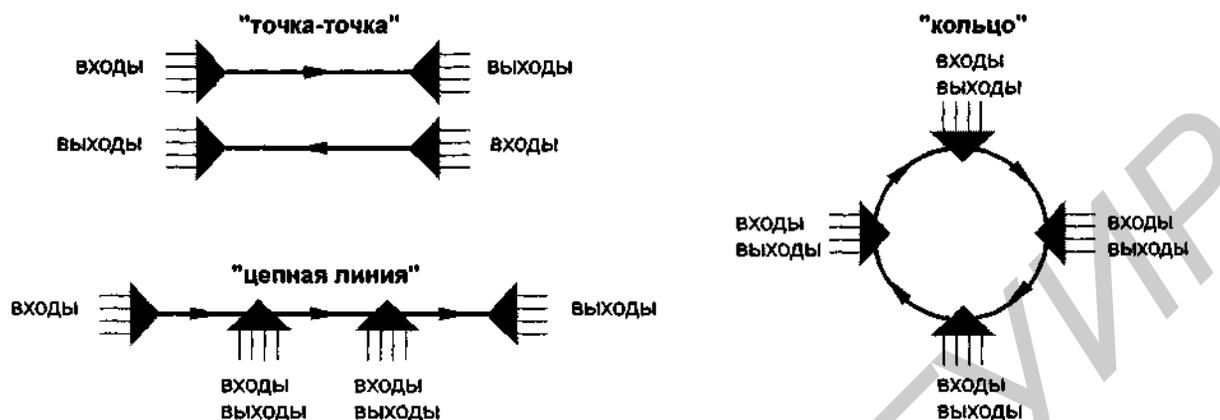


Рис. 5.2. Основные типы логической топологии мультиплексных систем

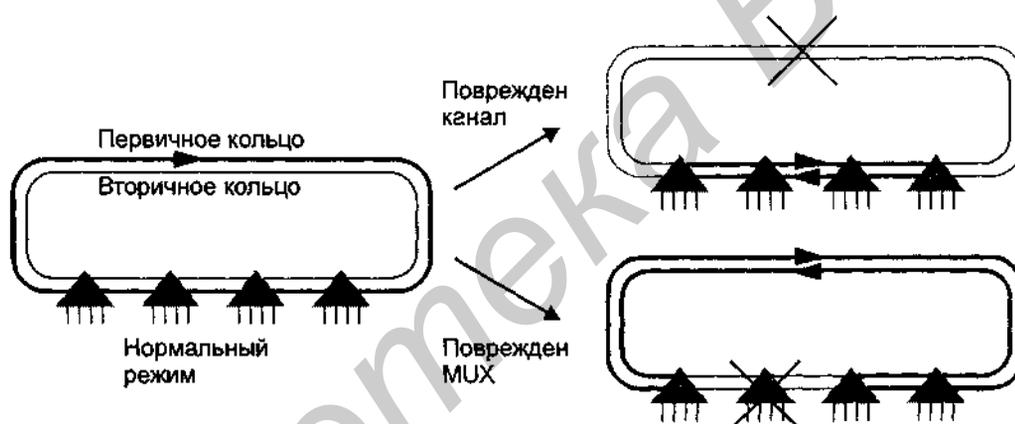


Рис. 5.3. Физическая топология "двойное TDM кольцо" повышает надежность сети в случае повреждения одного из сегментов сети или выхода из строя одного из мультиплексоров

Физическая топология определяет структуру кабельной системы. Для повышения надежности сложные мультиплексные сети, использующие логическую топологию "кольцо", делают с использованием физической топологии "двойное кольцо", рис. 5.3. В нормальном состоянии активно первичное кольцо – по вторичному кольцу данные не идут. При повреждениях канала связи или одного из мультиплексоров происходит свертывание логического кольца с восстановлением его целостности, при котором активизируется вторичное кольцо – общая целостность сети также сохраняется. Физическая топология "двойное кольцо" используется и в сетях SDH, а также в некоторых локальных сетях Token Ring, DQDB, FDDI.

По каждому из каналов мультиплексор может поддерживать одну из шести функций выделения, добавления или пропуска каналов (drop-add-pass), рис. 5.4:

1. "Drop & Add" (выделение и добавление канала). Эту функцию могут поддерживать мультиплексоры как при цепной (на промежуточных узлах), так и при кольцевой логических топологиях. При цепной топологии один выходной канал может быть заменен на другой, например, при использовании специальных мультиплексоров для межстудийного обмена

на в сетях цифрового кабельного телевидения. При кольцевой топологии этой функцией могут обладать два или более мультиплексоров, которые сообща используют данный TDM канал, например, при организации удаленной связи сетей Ethernet или Token Ring. Фактически происходит подмена информации в соответствующих тайм-слотах.

2. "Drop & Pass" (выделение и пропускание). Эта функция наиболее характерна для физической топологии "цепная линия". Основная задача – размножить информационный поток. Структура ретранслируемых в мультиплексный канал тайм-слотов остается без изменения.
3. "Pass Only" (только пропускание). Эта функция обычно автоматически обрабатывается мультиплексором, если в физический слот мультиплексора, соответствующий данному каналу (номеру тайм-слота), не установлен ни один модуль.
4. "Terminate & Add" (прервать и добавить). Эта функция подменяет информацию в тайм-слотах соответствующего канала на новую, взятую из входного низкоскоростного канала. Превенная информация не выводится наружу и становится недоступной как для текущего, так и для последующих мультиплексоров. Эта функция фактически предназначена для начального (мастер) мультиплексора при физической топологии "цепная линия".
5. "Drop Only" (только выделение). Эта функция характерна для конечного мультиплексора при физической топологии "цепная линия".
6. "Terminate" (прерывание). Эта функция характерна для конечного мультиплексора при физической топологии "цепная линия". Функция автоматически обрабатывается конечным мультиплексором, если в физический слот мультиплексора, соответствующий данному каналу (номеру тайм-слота), не установлен ни один модуль.

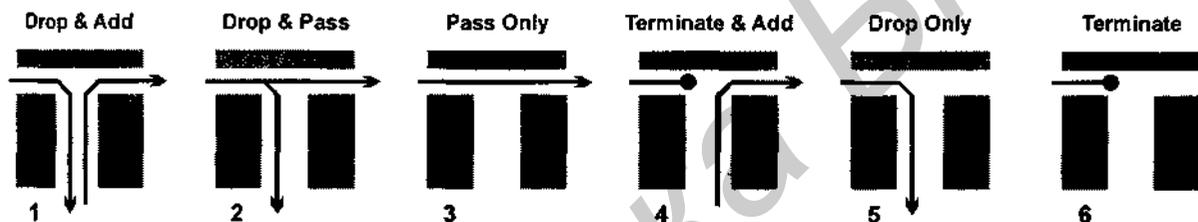


Рис. 5.4. Функции выделения, добавления и пропускания канала

В практических реализациях скоростной мультиплексный канал строится преимущественно на основе волоконно-оптического интерфейса. Существует огромное разнообразие мультиплексоров, использующих волоконно-оптическую TDM-магистраль.

Оптический модем-мультиплексор *Optimux* производства *RAD*. Внешний вид и схема включения модема показаны на рис. 5.5, а в табл. 5.1 приведены технические характеристики.

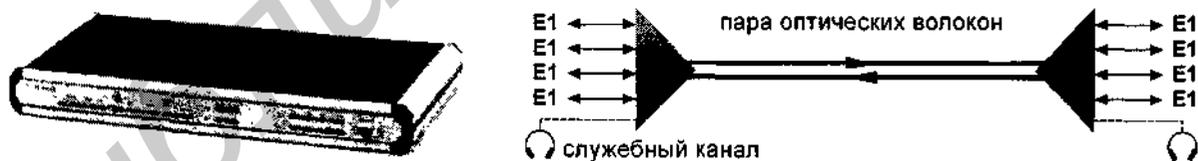


Рис. 5.5. Внешний вид и схема подключения оптического модема-мультиплексора *Optimux* производства *RAD Data Communications*

Аналогичные оптические модемы-мультиплексоры, также широко используемые на российском рынке, выпускаются фирмами: ADC Telecommunications – продукт Quad Fiber Loop Converter, 4x E1 [2]; и Pan Dacom – продукт FME-H, 6x E1 [3]

Таблица 5.1. Основные технические характеристики оптического модема-мультиплексора *Optimix* производства *RAD Data Communications* [1]

Тип логического соединения	точка-точка
Тип физического соединения	точка-точка
Полная емкость мультиплексного канала, Мбит/с	8 (канал E2)
Тип среды передачи	оптическое волокно многомодовое (mm) / одномодовое (sm), коаксиальный кабель
Оптические передатчики (LED – светодиод, LD – лазерный диод)	850 нм mm LED / 1300 нм sm LED / 1300 нм sm LD / 1550 нм sm LD
Тип оптических соединителей	ST, SC или FC
Максимальное расстояние оптического сегмента, км	75
Число входных каналов E1	4
Поддерживаемые интерфейсы по низкоскоростным входным каналам	ITU G.703, G.742, G.823, G.956
Другие характеристики	Голосовой служебный канал, допускается резервирование по каналу связи (автоматическое реконфигурирование при повреждении) и по питанию, управление через ASCII терминал или по SNMP протоколу

Модульный TDM мультиплексор MagnumPlus фирмы *ADC Kentrox*. Это – более универсальное и более мощное решение, допускающее передачу множества различных протоколов. Его основные характеристики приведены в табл. 5.2.

Отметим, что логическая топология взаимодействия мультиплексоров *MagnumPlus* по TDM магистрали базируется на кольце, в то время как физическое соединение может быть как точка-точка, кольцо, или цепная линия. Кольцевая логическая топология необходима для дистанционного мониторинга и управления мультиплексорами на основе TDM магистрали.

При инициализации TDM магистрали одно из устройств автоматически выбирается мастером – по нему синхронизируются все остальные устройства. При подключении мультиплексоров через сеть SDH, синхронизация происходит от SDH магистрали.

Таблица 5.2. Основные технические характеристики мультиплексора *MagnumPlus* [4]

Тип логического соединения	кольцо
Тип физического соединения	точка-точка, двойное кольцо, цепная линия
Полная емкость мультиплексного канала, Мбит/с	155 (возможно подключение устройств через магистраль STM-1)
Тип среды передачи	оптическое волокно многомодовое (mm)/ одномодовое (sm)
Характеристики модулей общей логики	1300 нм: mm, 12 дБ / mm, 20 дБ / sm, 20 дБ / sm, 30 дБ 1550 нм: sm, 20 дБ
Число тайм-слотов в мультиплексном канале	28
Число In/Out слотов на одно шасси	8 (гибкое приписывание физических слотов к тайм-слотам)
Емкость тайм-слота, Мбит/с	4,7
Поддерживаемые интерфейсы по низкоскоростным входным каналам	Ethernet, Token Ring, EIA RS-449/RS-422, V.35, RS-232, RS-530, E1/T1, IBM 3270, AS/400, System/3X
Другие характеристики	Допускается резервирование по каналу связи (автоматическое реконфигурирование двойного кольца при повреждении) и по питанию, управление по SNMP протоколу, гибкое приписывание In/Out модулей в физических слотах к тайм-слотам

Модули MagnumPlus, рис. 5.6:

- Интерфейсные модули (IN/OUT). Чтобы удовлетворить тем или иным специфическим требованиям, имеется большое разнообразие модулей, среди которых – модули Ethernet Switch (разъем AUI, BNC, F/O), Token Ring 4 или 16 Мбит/с (разъем DB9), E1 (G.703);
- Модули питания. Питание может осуществляться от 48V DC, 110V AC, 220V AC. Для обеспечения защиты на случай выхода из строя блока питания допускается установка до двух блоков питания с распределяемой нагрузкой;
- Модуль контрольной логики. Необязательный модуль, позволяющий осуществлять дистанционное SNMP управление и мониторинг;
- Модули общей логики. Обеспечивают все необходимые возможности мультиплексирования и демultipлексирования на основе волоконно-оптического интерфейса (155 Мбит/с) или интерфейса на коаксиальном кабеле (DS3, 45 Мбит/с).

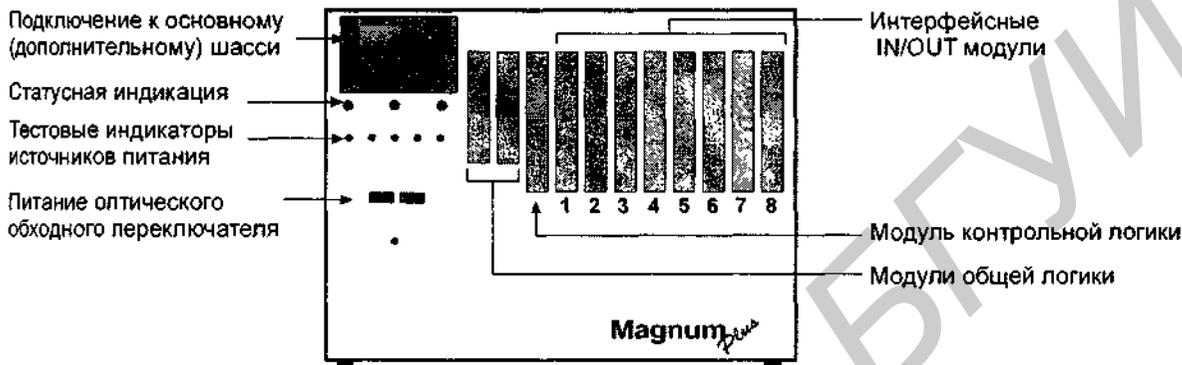


Рис. 5.6. Вид шасси мультиплексора MagnumPlus производства ADC Kentrox

Похожие модульные TDM мультиплексоры выпускаются фирмами NBase-Fibronics (Multi-HUB) [5] и Racal Data Group (PremNet 5000, PremNet Branch) [6].

Синхронная цифровая иерархия SDH – наиболее широко распространенная технология синхронного временного мультиплексирования – рассматривается в главе 8.

Статистическое (асинхронное) временное мультиплексирование

Взрывная природа трафика, свойственная сетям передачи данных, привела к разработке более гибкого метода мультиплексирования – статистического. В этом методе тайм-слоты не приписываются жестко за каналами и могут более свободно распределяться под приходящие по разным каналам данные. Времена прибытия данных, а не номера низкоскоростных каналов определяют последовательность, в которой данные от разных каналов размещаются в тайм-слоты. Каждый раз, когда тайм-слот испускается в мультиплексную линию, мультиплексор добавляет к нему специальный идентификатор, по которому демultipлексор на другом конце определяет, в какой выходной канал перенаправить содержимое данного тайм-слота. Если на вход мультиплексора данные не поступают, то он передает пустые тайм-слоты с пустыми полями идентификаторов. Асинхронность выражается не в асинхронном испускании тайм-слотов – они следуют строго регулярно, а в допустимости асинхронного размещения приходящих данных в тайм-слоты.

Заметим, что идентификатор, выполняя очень важную функцию в этом методе мультиплексирования, является служебной информацией и, таким образом, уменьшает полосу, которая могла бы использоваться под передачу данных.

Статистический TDM мультиплексор предоставляет приложению такую полосу, которую оно запрашивает, если, конечно, эта величина не превосходит свободной емкости мультиплексной линии. Суммарная величина полос пропускания низкоскоростных каналов, входящих в мультиплексор, может превосходить полосу пропускания скоростного канала. Игра идет на том, что не все низкоскоростные приложения осуществляют одновременно передачу.

Статистическое мультиплексирование требует более сложного управления и значительно большей вычислительной мощности от оборудования.

Сначала статистическое мультиплексирование было использовано в сетях с протоколом X.25, позже – в сетях Frame Relay и ATM.

В табл. 5.3 приведен сравнительный анализ синхронного и статистического методов временного мультиплексирования. Как видно из таблицы, преимущества одного метода можно рассматривать в некоторой степени как недостатки другого.

Таблица 5.3. Синхронное и статистическое мультиплексирование TDM

Преимущества синхронного TDM	Недостатки статистического TDM
<ul style="list-style-type: none"> • Простая технология изготовления мультиплексора • Гарантированная полоса пропускания для всех приложений, потери при передаче отсутствуют • Не требуется использование специальных идентификаторов каналов • Высокая защищенность потока данных внутри тайм-слота 	<ul style="list-style-type: none"> • Более сложная технология изготовления мультиплексора, выше стоимость • Могут быть потери или задержки в приложениях с меньшим приоритетом – не всегда гарантируется полоса • Требуется использование специальных идентификаторов каналов, которые являются служебными и отнимают часть полосы. Более сложное конфигурирование
Преимущества статистического TDM	Недостатки синхронного TDM
<ul style="list-style-type: none"> • Выше эффективность мультиплексного канала при работе с сетями передачи данных • Приложение может использовать всю полосу канала, если он свободен. Емкие критические к задержкам приложения могут быть быстро переданы • Допускается система приоритетов по получению доступа и к каналу и по требуемой полосе для приложения • Высокая гибкость в организации соединений 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая эффективность при работе с сетями передачи данных • Приложение может использовать только емкость отведенного тайм-слота

Пример 5.1. Расчет производительности статистического мультиплексора.

Допущения. Рассмотрим работу гипотетического статистического 4-канального мультиплексора, рис. 5.7 а [7]. Пусть максимальная скорость (полоса пропускания) каждого из 4-х входных каналов составляет 300 бит/с, а входные данные представляются 8-битными символами в обкладках "старт" и "стоп" битов. В процессе мультиплексирования биты "старт" и "стоп" сбрасываются, а два дополнительных бита – поле идентификатора – добавляются к тайм-слотам в мультиплексном канале, что приводит к общей длине 10 бит для тайм-слота.

Отклонения. Из-за нерегулярности входных потоков, средняя скорость по каждому из низкоскоростных каналов меньше 300 бит/с. Мультиплексный канал работает на скорости 600 бит/с. Таким образом, полоса пропускания мультиплексного канала в два раза меньше суммарной емкости 4-х низкоскоростных каналов. Каждый символ, прибывающий на мультиплексор, преобразуется в соответствующий тайм-слот. Если символы с разных каналов приходят на мультиплексор одновременно, они обрабатываются последовательно в соответствии с предустановками. При условиях рис. 5.7 а средняя битовая скорость по первому каналу равна 120 бит/с, по второму – 150 бит/с, по третьему – 120 бит/с, по четвертому – 90 бит/с. В итоге средняя битовая входная скорость равна 480 бит/с. Загруженность мультиплексного канала составляет 80% (заполнены 16 слотов из 20). Эффективность кода равна 80% – каждый тайм-слот содержит двухбитный идентификатор, вследствие чего полезная информация составляет 8 бит из 10-ти в тайм-слоте, в выходная скорость – 480 бит/с (выход 64% = загруженность x эффективность кода).

Для сравнения на рис. 5.7 б приведены параметры работы синхронного мультиплексора. Эффективность кода 100% является следствием отсутствия при синхронном мультиплексировании служебных идентификаторов у тайм-слотов.

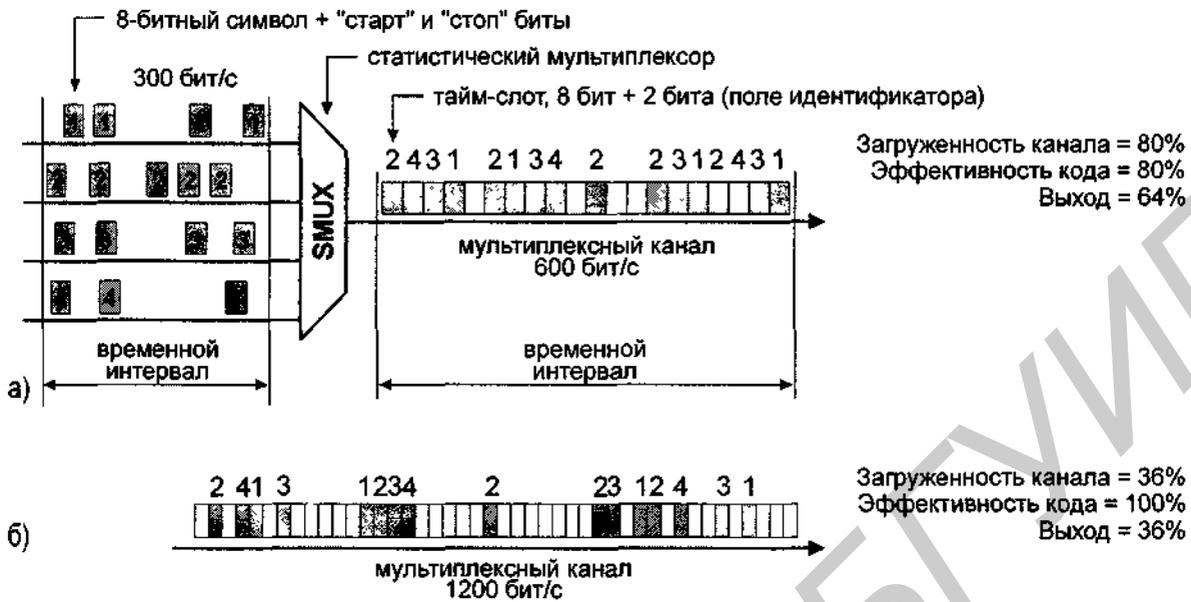


Рис. 5.7. Схема работы статистического (а) и синхронного (б) мультиплексоров

Инверсное мультиплексирование

Если обычное мультиплексирование объединяет n низкоскоростных каналов в один высокоскоростной, то *инверсное мультиплексирование* можно рассматривать как обратную процедуру, то есть как способ передачи скоростного потока данных посредством нескольких независимых каналов меньшей полосы пропускания, которые существуют на промежуточном участке между точками входа и выхода скоростного потока.

Инверсное мультиплексирование используется для передачи широкополосного сигнала, который не способен разместиться в одном независимом канале существующей телекоммуникационной сети. Например, сигнал видеоконференции емкости 384 Кбит/с не может быть передан по каналу 64 Кбит/с, но может быть разбит и размещен в шести таких каналах и вновь собран на другом конце. Также используют инверсное мультиплексирование, когда мультиплексор (или коммутатор) на промежуточном узле магистральной сети не может обрабатывать емкости больше заданной, например 64 Кбит/с.

На приемной стороне инверсный демультиплексор получает информацию с разных каналов и проводит сборку сигнала – эта процедура может требовать переупорядочения потоков из разных сегментов и компенсации задержек, возникающих в различных низкоскоростных сегментах. Принципы работы инверсного мультиплексора показаны на рис. 5.8.



Рис. 5.8. Инверсный мультиплексор

Инверсное мультиплексирование в ВОЛС. При передаче широкополосного сигнала по волокну на очень большие расстояния (до 1000 км и более) приходится считаться с затуханием и дисперсией сигнала в волокне. Затухание можно компенсировать при помощи оптических усилителей (EDFA), установленных на промежуточных узлах. Дисперсию также можно уменьшать, используя специальные методы компенсации дисперсии (см. главу 2), но лишь до определенного предела. Кроме того, оптические усилители вносят дополнительный шум. Из двух оптических сигналов меньше подвержен влиянию шума и дисперсии тот сигнал, который модулируется меньшей частотой. В настоящее время прорабатываются проекты построения городских оптических супермагистралей на скорости 10/100 Гбит/с. В примере 2.5 (глава 2) приведена оценка максимального расстояния для канала с частотой 100 ГГц – 20 км. При построении интерсетей такой же высокой пропускной способности, единственный способ передать широкополосный сигнал – это разбить его на множество низкоскоростных сигналов, рис. 5.9 [8]. В результате мультиплексный сигнал, представленный множеством длин волн, лучше противостоит влиянию дисперсии и вносимому шуму оптических усилителей в протяженной линии. В рассмотренном примере инверсное мультиплексирование совмещено с частотным (временным) мультиплексированием.

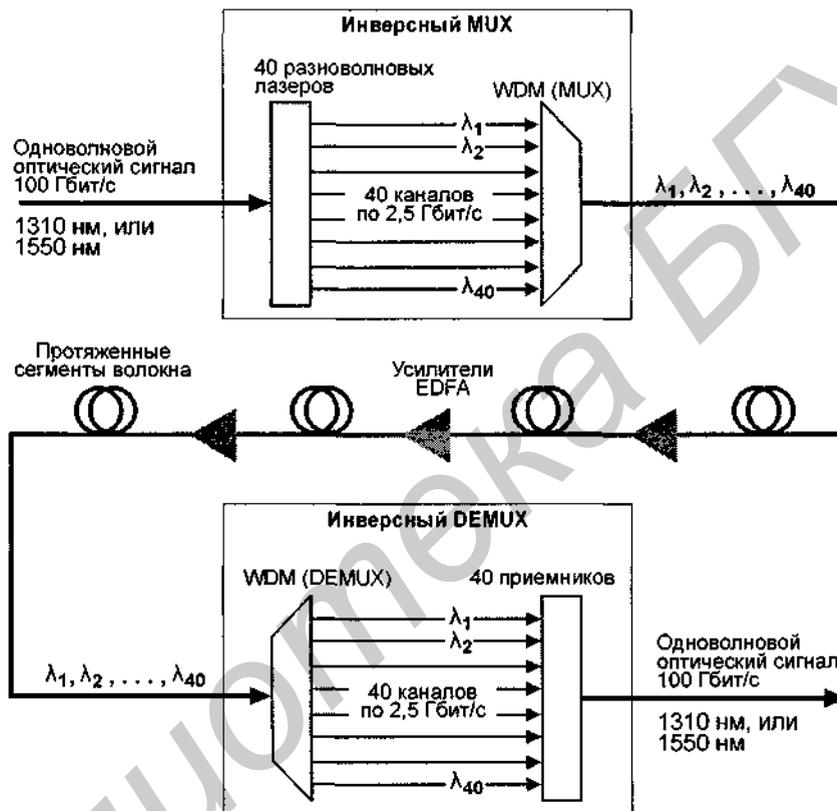


Рис. 5.9. Инверсное мультиплексирование канала 100 Гбит/с в 40 каналов 2,5 Гбит/с

5.2. Сети с коммутацией каналов и пакетов

Передача данных³ между двумя удаленными оконечными сетевыми устройствами обычно осуществляется через промежуточные сетевые узлы – узлы коммутации. В качестве оконечного устройства могут выступать рабочая станция, хост компьютер, терминал, телефон или другое коммуникационное устройство. Соответственно, разные функции могут иметь связанные между собой физическими каналами узлы коммутации. Совокупность оконечных устройств и узлов коммутации образуют *сеть передачи данных*, рис. 5.10.

³ Этот термин используется здесь и далее в более общем смысле, включая передачу голоса или видеозображения.

На рис. 5.11 приведен спектр различных технологий коммутации для передачи данных по сети. Два крайних случая представляют две основные традиционные технологии коммутации: *коммутация каналов* и *коммутация пакетов* [9, 10].

Соединение с коммутацией каналов состоит в том, что на время передачи в сети создается канал, обеспечивающий вполне определенную, как правило, фиксированную скорость передачи данных, на которой приемное и передающее устройства поддерживают связь. Характерным примером сетей с коммутацией каналов являются телефонные сети с множеством АТС, включая традиционные аналоговые и более современные цифровые сети ISDN. Особенностью таких сетей является длительное время установления соединения (в аналоговых сетях до нескольких секунд и более).

Особенностью работы сетевых устройств в локальной сети является их очень быстрое взаимодействие с сетью (десятки миллисекунд и меньше). Технологии передачи данных, характерные для локальных сетей, преимущественно используют контролируемую со стороны рабочих станций пакетную коммутацию.

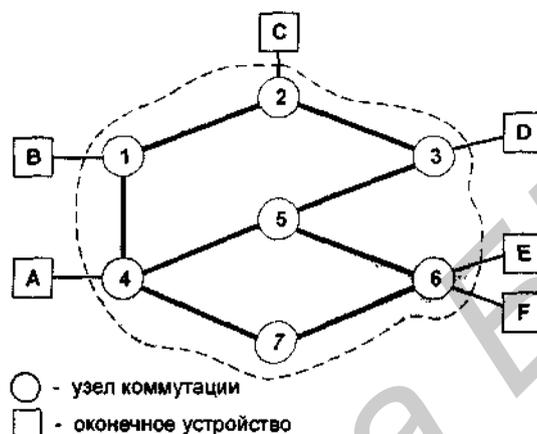


Рис. 5.10. Сеть передачи данных

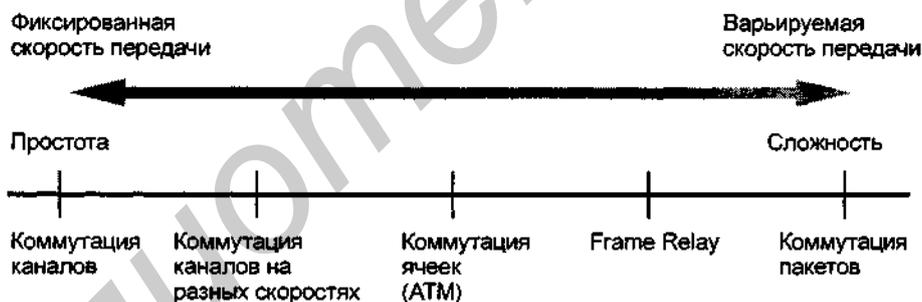


Рис. 5.11. Спектр технологий коммутации

Коммутация каналов

При использовании коммутации каналов подразумевается наличие выделенного коммуникационного канала между взаимодействующими устройствами. Этот путь образуется последовательностью определенных узлов сети.

Связь посредством коммутации каналов включает три фазы, объяснение которых проведем с использованием рис. 5.10.

1. *Установление канала.* Для простоты будем рассматривать передачу данных в одном направлении. Пусть устройство А хочет передавать данные на устройство Е. Прежде чем данные начнут передаваться, должен установиться канал, соединяющий оконечные станции через цепь узлов. Например, станция А посылает запрос узлу 4 с требованием установить соединение со станцией Е. Поскольку сегмент А-4 – выделенная линия, то

часть канала уже существует. Узел 4 должен определить следующий узел в маршруте, ведущий к узлу 6. Основываясь на информации о маршрутах и анализируя стоимости каналов, узел 4 выбирает канал, например к узлу 5, выделяя в этом канале (используя мультиплексирование TDM или FDM) соответствующую полосу. После этого выделенный канал установлен от устройства А через узел 4 до узла 5. Поскольку несколько станций может быть подключено к узлу 4, он должен быть способен устанавливать внутренние пути от множества станций к множеству узлов. Теперь узел 5 по аналогии с узлом 4 устанавливает канал к узлу 6 и внутренне привязывает этот канал к каналу, идущему от узла 4. Далее узел 6 завершает соединение с устройством Е. По завершении соединения проводится тестирование, определяющее, свободно ли устройство Е, готово ли оно принимать данные.

2. *Передача данных.* Если устройство Е свободно, данные могут передаваться через сеть. Данные могут быть цифровыми (например, взаимодействие терминала с хостом) или аналоговыми (например, передача голоса). Сигнализация и передача могут быть как цифровыми, так и аналоговыми. В любом случае, путь образуется через: сегмент А-4, внутреннюю коммутацию на узле 4, сегмент 4-5, внутреннюю коммутацию на узле 5, сегмент 5-6, внутреннюю коммутацию на узле 6 и сегмент 6-Е. В общем, происходит установление и обратного канала, так что соединение является полнодуплексным, и данные могут передаваться в обоих направлениях.
3. *Отсоединение канала.* После определенного времени передачи данных соединение завершается, обычно после соответствующей команды от одной из станций. Сигналы разъединения должны пройти по узлам 4, 5, 6, чтобы высвободить ресурсы в сеть.

Подчеркнем, что путь соединения устанавливается до начала передачи данных. Таким образом, соответствующая емкость, требуемая для данного канала передачи, должна быть в наличии и резервируется между парами узлов на всем пути еще на этапе установления канала. Для этого каждый узел должен иметь внутреннюю коммутационную емкость, чтобы обеспечить соединение.

Коммутация каналов может быть довольно неэффективной. Емкость установившегося канала выделяется на время соединения конечных устройств и не доступна под другие приложения, даже если данные не передаются. Для телефонных сетей эффективность голосового канала весьма далека от 100%. Еще хуже обстоит дело при подключении удаленного терминала к хосту, когда данные могут вовсе не идти в течение долгого времени, и канал будет простаивать. С точки зрения производительности, задержка вносится на этапе установления соединения. Однако, если соединение установлено, то сеть прозрачна по отношению к конечным устройствам, и данные идут с минимальными задержками.

Коммутация пакетов

Протяженные телекоммуникационные сети с коммутацией каналов при разработке оптимизировались для достижения наилучших характеристик при передаче голоса, и подавляющая доля потока данных в этих сетях связывалась именно с голосовой передачей. Ключевая характеристика таких сетей в том, что ресурсы внутри сети выделяются под определенные телефонные вызовы. Для голосового соединения это не плохо, поскольку один из абонентов обычно говорит, и канал не простаивает. Можно сказать, что дуплексный канал при телефонной связи используется на 50%. Полоса пропускания для канала также оптимизирована и установлена как раз такой, чтобы можно было обеспечить приемлемое качество передачи речи. Однако при использовании таких телекоммуникационных сетей для передачи данных между компьютерами, появляются два очевидных недостатка.

1. При типовом соединении (например, терминал-хост) значительную часть времени канал связи может быть свободен. Но телекоммуникационная сеть выделяет вполне определенную полосу пропускания под этот канал и не может использовать его для другого приложения. Таким образом, подход с коммутацией каналов не эффективен.
2. В сетях с коммутацией каналов соединение обеспечивает передачу на постоянной скорости. Поэтому любой паре устройств терминал-хост будет предоставлена одна и та же фиксированная скорость, что ограничивает возможности сети при подключении разнообразных хостов и терминалов.

Сеть с коммутацией пакетов способна устранить эти недостатки. Данные в такой сети передаются в виде блоков, называемых *пакетами* (или *кадрами*). Обычно верхний предел длины пакета в зависимости от стандарта может быть от тысячи до нескольких тысяч байт.

Если устройство – источник передачи желает передать данные размером больше максимальной длины пакета, то данные разделяются на несколько пакетов, рис. 5.12.

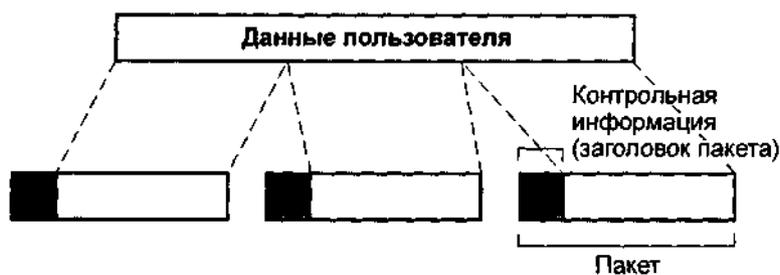


Рис. 5.12. Пакеты

Каждый пакет имеет поле данных, заголовок, другие служебные поля, расположенные в начале или в конце пакета. Поле заголовка, как минимум, включает информацию, необходимую узлу сети для перенаправления (маршрутизации) пакетов в нужный канал. Возможна буферизация пакетов на узле.

На рис. 5.13 показаны основные операции. Рабочая станция или другое сетевое устройство посылает сообщение (например, файл данных) в виде последовательности пакетов (а). Каждый пакет наряду с данными содержит управляющую и/или контрольную информацию, в частности, адрес станции назначения, или идентификатор маршрута. Пакет первоначально посылается на узел, к которому подключена передающая станция. Узел, получая пакет, определяет по контрольной информации направление маршрута и на основании этого перенаправляет пакет в выходной порт соответствующего канала. Если связь между узлами по этому каналу исправна, пакет передается на соседний узел. Все пакеты последовательно "обрабатывают" свои пути, двигаясь через сеть к нужной станции назначения. Коммутация пакетов имеет несколько преимуществ над коммутацией каналов.

1. Эффективность использования линии при пакетной коммутации выше, поскольку один сегмент от узла к узлу может динамически распределять свои ресурсы между многими пакетами от разных приложений. Если на передающем узле пакетов, предназначенных для отправки по определенному каналу, собирается больше, чем емкость этого канала, то пакеты помещаются в буфер, и устанавливается очередность передачи пакетов. Напротив, в сетях с коммутацией канала время, предназначенное для каждого приложения, выделяется в виде определенного тайм-слота на основе синхронного временного мультиплексирования. Максимальная скорость передачи определяется полосой этого тайм-слота, а не всей полосой канала.
2. Сеть с пакетной коммутацией может осуществлять преобразование скорости передачи данных. Так способны обмениваться между собой пакетами станции, подключенные к соответствующим узлам сети каналами разной полосы пропускания.
3. Когда поток через сеть с коммутацией каналов возрастает, сеть может оказаться перегруженной, и в установлении каналов связи между новыми станциями может быть отказано. При перегруженности телефонной сети попытка дозвона может быть заблокирована. В сетях с пакетной коммутацией при большой загруженности передача пакетов сохраняется, хотя и могут возникать задержки с доставкой пакетов, или может уменьшаться скорость передачи.
4. В сетях с пакетной коммутацией можно использовать систему приоритетов. Если узел хочет передать несколько пакетов, то он может, в первую очередь, передать пакеты, имеющие наивысший приоритет. Пакеты с высоким приоритетом будут доставляться с меньшей задержкой, чем пакеты с низким приоритетом.

Пусть одна станция хочет послать сообщение другой в виде файла, размер которого превосходит максимальный размер пакета. Станция распределяет содержимое файла между несколькими пакетами и последовательно направляет пакеты в сеть. И здесь возникает вопрос, каким образом сеть должна обрабатывать эту последовательность пакетов, чтобы доставить их нужному адресату. В современных сетях с коммутацией пакетов используются два

различных подхода, получившие название: дейтаграммные сети и сети с виртуальными каналами.

В дейтаграммной сети каждый пакет передается без ссылки на пакеты, которые идут до или после него, рис. 5.13.

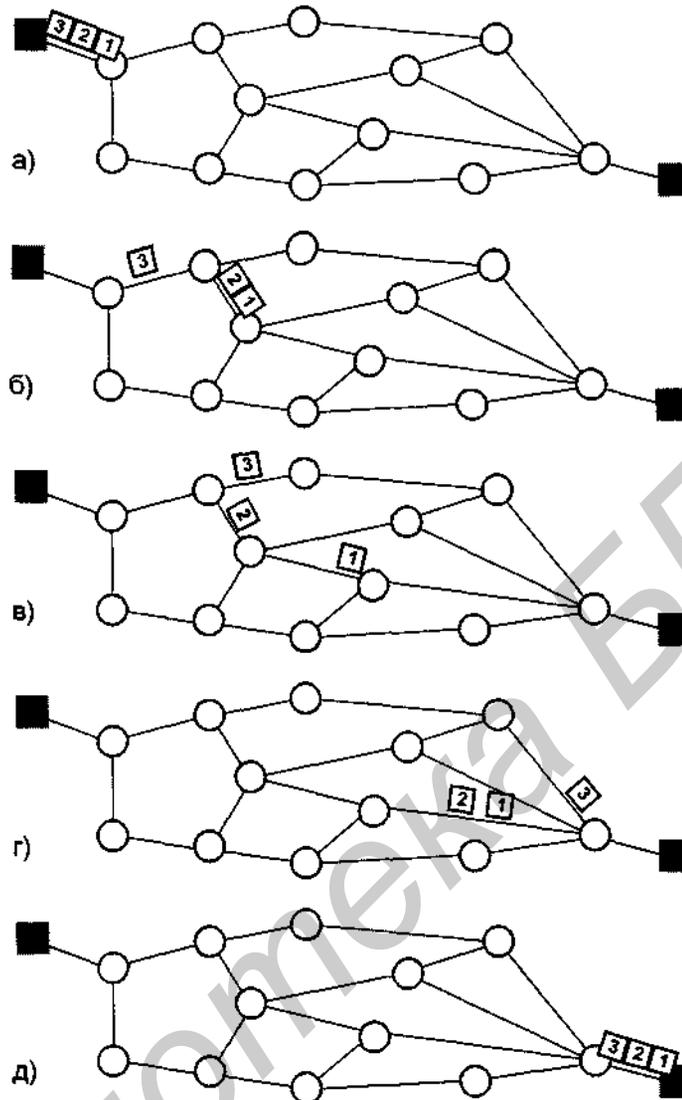


Рис. 5.13. Пакетная коммутация – дейтаграммная сеть

Каждый узел на основании контрольной информации заголовка пакета и собственных данных об окружающих узлах сети выбирает следующий узел, на который перенаправляется пакет. Пакеты с одним и тем же адресом назначения могут следовать от станции отправителя к станции назначения разными маршрутами. Конечный узел маршрута восстанавливает правильную последовательность пакетов и уже в этой последовательности передает их станции назначения. В некоторых дейтаграммных сетях может отсутствовать функция упорядочения пакетов на выходном узле – тогда эту функцию берет на себя станция назначения. Пакет может повредиться при передаче по сети. Например, если один из узлов в сети вышел из строя, то все пакеты, находящиеся на этом узле в очереди на передачу, будут потеряны. Опять же, функцию обнаружения потерянных пакетов может брать на себя как конечный узел маршрута, так и станция-получатель. В такой сети каждый пакет передается независимо от остальных и называется дейтаграммой.

В сети с виртуальными каналами перед тем, как пакеты начинают идти, создается определенный маршрут следования. Это маршрут служит для поддержки логического соединения

между удаленными станциями. Если маршрут установлен, то все пакеты между взаимодействующими станциями будут идти строго по этому маршруту, рис. 5.14. Поскольку на время логического соединения маршрут строго фиксирован, то такое логическое соединение в некоторой степени аналогично образованию канала в сетях с коммутацией каналов и называется *виртуальным каналом*. Каждый пакет теперь содержит идентификатор виртуального канала наряду с полем данных. Все узлы по маршруту знают, куда направлять такие пакеты – никакого решения по маршрутизации теперь эти узлы не принимают. В любое время каждая станция может установить один или несколько виртуальных каналов с другой станцией или станциями. Заметим, что виртуальный канал не является выделенным каналом, что было характерно для сетей с коммутацией каналов. Пакеты, двигаясь по виртуальному каналу, могут в случае перегруженности узла или сегмента помещаться в входные и выходные буферы на узлах. Главное различие с дейтаграммным подходом и классической маршрутизацией состоит в том, что в сетях с виртуальными каналами узел не принимает решения о выборе маршрута для каждого входящего пакета, а делает это (вернее, получает инструкции куда перенаправлять пакеты с соответствующими идентификаторами маршрута) только один раз – на этапе формирования виртуального канала.

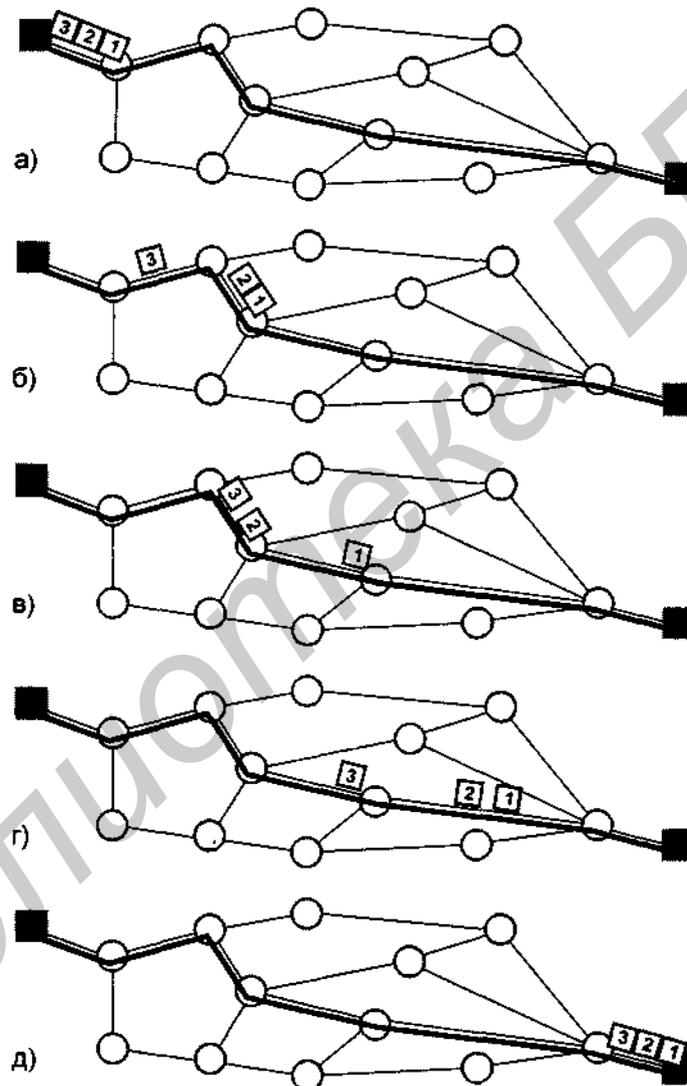


Рис. 5.14. Пакетная коммутация – сеть с виртуальными каналами

Преимущества сети с виртуальными каналами. Если две станции желают обмениваться данными на протяжении длительного времени, то подход с использованием виртуальных ка-

налов имеет определенные преимущества. Первое, сеть может поддерживать ряд служб, связанных с виртуальными каналами, включая порядок следования, контроль ошибок и контроль потока. Правильный *порядок следования* легко поддерживается, поскольку все пакеты двигаются одним и тем же маршрутом и прибывают в первоначально установленной последовательности. *Служба контроля ошибок* гарантирует не только то, что пакеты прибывают в нужной последовательности, но и то, что все пакеты на приемной стороне корректны. Например, если один из пакетов в последовательности, двигаясь от узла 4 к узлу 6 (рис. 5.14) потерялся или пришел на узел 6 с ошибкой, то узел 6 может послать запрос на узел 4 с просьбой повторить соответствующий пакет последовательности. *Служба контроля потока* гарантирует, что отправитель не может "завалить" получателя данными. Например, если станция E буферизует данные от станции A и видит, что приемный буфер близок к переполнению, то она может просигнализировать через обратный виртуальный канал о необходимости уменьшить или временно прекратить передачу данных от станции A. Второе преимущество этой сети состоит в том, что пакеты передаются через узел быстрее, когда узел не принимает решения о маршрутизации пакета.

Преимущества дейтаграммной сети. Первое – при передаче пакетов в дейтаграммной сети отсутствует фаза установления логического виртуального канала. Второе – дейтаграммная служба более примитивна и допускает большую гибкость. Например, если один из узлов в сети с использованием виртуальных каналов становится перегруженным, то "открытые" виртуальные каналы, проходящие через этот узел, невозможно перестроить. В дейтаграммной сети при перегрузке одного из узлов другие узлы могут перенаправить приходящие пакеты в обход перегруженного узла. Третье – доставка самой дейтаграммы более надежна. При использовании виртуальных каналов, если узел повреждается, все проходящие через него виртуальные каналы также разрушаются.

Коммутация каналов на разных скоростях и сети ISDN

Один из недостатков сетей с коммутацией каналов – это отсутствие гибкости в отношении предоставляемой полосы пропускания. Если станция подключена к традиционной телекоммуникационной сети с коммутацией каналов, она вынуждена работать на определенной скорости передачи данных. Это скорость или полоса пропускания будет предоставлена станции независимо от приложения, оцифрованный ли это голос или передача файлов данных. В результате приложение с низкой скоростью будет не эффективно использовать предоставленный канал, а приложение, которому требуется высокая скорость передачи данных, наоборот, будет ограничено в выделенной емкости канала.

Для преодоления негибкости используется расширенная служба предоставления канала, известная как коммутация каналов на разных скоростях. Эта техника объединяет коммутацию каналов с мультиплексированием. Станция подключается к сети при помощи единственного канала связи. По этому каналу могут передаваться данные на разных предварительно установленных скоростях с определенной дискретизацией. Поток по каждому каналу может коммутироваться независимо через сеть в различных направлениях.

Для этой техники можно построить схему, при которой все возможные каналы работают на одной и той же фиксированной скорости, или схему, которая использует различные скорости передачи данных. Примером служит сеть ISDN.

ISDN обеспечивает коммутируемую систему связи с комплексом услуг по передаче как данных, так и голоса. Определены два интерфейса доступа к ISDN: интерфейс базового доступа (BRI) и интерфейс основного доступа (PRI). BRI (144 Кбит/с) обеспечивает два речевых канала типа В со скоростью передачи 64 Кбит/с и один сигнальный канал типа D со скоростью передачи 16 Кбит/с (2В+D). PRI позволяет работать с каналами T1 (1,544 Мбит/с) и E1 (2,048 Мбит/с), которые разделены на 23 и 30 каналов типа В соответственно, и, кроме этого, имеют один сигнальный D-канал полосой 64 Кбит/с (23В+D или 30В+D). Выделенная линия может использовать как отдельный В-канал, так и их комбинацию для достижения большей полосы пропускания. Как установление, так и разъединение связи между абонентами осуществляется цифровым образом через сигнальный канал D и происходит почти мгновенно.

Почему пользователи (абоненты) могут предпочесть ISDN альтернативным решениям: модемам, выделенным линиям и другим службам глобальных сетей? Во первых, если сравнивать с работой модемов на аналоговых линиях, то ISDN дает с учетом компрессии передаваемых данных выигрыш от 8 до 26 раз в пропускной способности. Во вторых, цифровая коммутация с технологической точки зрения более надежна, чем аналоговая. Цифровая коммутация также позволяет защищать данные, используя разнообразные алгоритмы шифрова-

ния. При значительно большей гибкости по сравнению с простой аналоговой коммутацией каналов в технологии ISDN сохраняется фундаментальное ограничение. Хотя пользователь имеет возможность выбора скорости передачи, сам набор скоростей остается вполне определенный, что не позволяет в конечном итоге эффективно использовать ресурсы сети.

Цифровые сети ISDN широко распространены сегодня, как альтернатива традиционным аналоговым абонентским сетям. Лидерами в распространении сервиса ISDN являются США, Япония и ряд европейских стран – Франция, Германия, Бельгия, Дания, Португалия, Великобритания.

Протокол X.25

Низкое качество каналов связи, которые были два десятилетия назад, сильная их подверженность воздействию помех и, как следствие, низкая достоверность передачи данных стали причиной разработки помехоустойчивых процедур передачи информации. Одним из наиболее широко распространенных и популярных протоколов, позволяющих решать проблемы плохих телефонных каналов связи, становится протокол X.25.

Протокол X.25 также задумывается как эффективное средство удаленного доступа к хост машинам. На основе коммутаторов X.25 несколько пользователей одновременно могут общаться с одним хостом, причем каждый пользователь загружает канал связи с хостом только на время передачи информации, при этом оставаясь на связи и в другие моменты времени. Поддержка связи обеспечивается благодаря установлению логического соединения или виртуального канала.

Протокол передачи данных с коммутацией пакетов X.25 разработан комитетом МККТТ (ныне ИТУ-Т) именно для работы по линиям связи с большим уровнем помех, каковыми, например, являются аналоговые телефонные линии. Для обеспечения требуемой достоверности передачи информации используется многоуровневая система обнаружения и коррекции ошибок.

Каждый узел коммутации сети X.25 на пути движения пакета проверяет целостность пакета, читает контрольную сумму, содержащуюся в его заголовке и вычисленную при передаче, находит ее значение для полученного пакета и сравнивает эти два значения. При небольшом количестве ошибок узел способен восстановить пакет и передать его дальше по пути следования. При этом узел посылает подтверждение предыдущему узлу о корректном приеме пакета. Если же восстановить пакет невозможно, делается запрос на его повторную передачу. По аналогичной схеме работают все сетевые узлы – коммутаторы X.25.

Высокий уровень помех на линии приводит к падению скорости передачи, и по этой причине многие сети с пакетной коммутацией работают со скоростью передачи до 64 Кбит/с. Кроме того, скорость передачи информации (не следует ее путать со скоростью передачи данных непосредственно в физическом канале) не остается постоянной и зависит от уровня помех и вызванных ими ошибок. Другими словами, время доставки одного пакета, обусловленное только качеством канала, не является постоянной величиной.

Ретрансляция кадров Frame Relay

Методы пакетной коммутации были разработаны в то время, когда в протяженных цифровых сетях при передаче данных появлялось большое количество ошибок. Как следствие, пакеты были перенасыщены заголовками и содержали большую избыточную информацию, позволяющую восстанавливать ошибки в пакетах. Восстановление пакетов и ликвидация ошибок входило в функции не только конечных станций, но и всех узлов сети, например, использование протокола X.25.

В современных скоростных телекоммуникационных сетях, применяющих волоконно-оптическую среду для передачи данных, уровень ошибок резко снизился. В результате большая избыточность кодировки поля пакета становится ненужной и лишь отнимает сетевые ресурсы.

Протокол Frame Relay разработан для использования на линиях связи с низким уровнем помех, каковыми являются волоконно-оптические магистрали. Именно поэтому в протоколе Frame Relay нет той избыточности, которая была характерна для X.25. В Frame Relay устранена система контроля ошибок всего кадра. Вместо этого сетевой коммутатор проверяет целостность полученного кадра и только для адресного поля осуществляет контроль ошибок. Если хотя бы один из этих тестов не проходит, коммутатором посылается запрос на повторную передачу кадра.

Если первоначальные сети с коммутацией каналов предоставляли конечному пользователю скорость около 64 Кбит/с, то сети Frame Relay позволили подключаться пользователям в глобальную телекоммуникационную сеть со скоростью 2 Мбит/с. Главным достоинством технологии Frame Relay стала низкая избыточность информации в пакете, что сильно увеличило производительность передачи данных в сети.

Первоначально предназначенные для объединения ЛВС сети Frame Relay сегодня охватывают широкий диапазон потоков данных, включая SNA, X.25 и ряд других. В то же время, Frame Relay получил ограниченное применение в территориальных сетях. Одна из причин кроется в том, что в стандарте заложена возможность передачи протяженных кадров, причем разной длины: передаваемые кадры могут иметь переменную длину до 1500 бит. Другая причина в том, что битовая скорость для потока данных от конкретного передающего устройства может быть непостоянной от узла к узлу в сети Frame Relay из-за статистического мультиплексирования пакетов разной длины. Таким образом, возможны задержки в следовании пакетов и вариации этих задержек. Хотя эти свойства весьма удобны для передачи данных (сообщений, команд, файлов и так далее), они плохо "уживаются" с передачей голоса и видеоизображения. Последние требуют передачи регулярных потоков, скорость же передачи информации от узла к узлу в сети Frame Relay не постоянна, и поэтому при передаче голоса или видеоизображения их качество может ухудшаться при большой загруженности сети.

Интерфейс Frame Relay, безусловно, останется пользовательским интерфейсом, но при подключении к глобальной сети он, очевидно, будет преобразовываться в более универсальный протокол АТМ.

Ретрансляция ячеек Cell Relay

Ретрансляция ячеек, более известная как АТМ, представляет собой кульминацию исследований в области пакетной коммутации и коммутации каналов на протяжении последних 20 лет. Удобно рассматривать технологию ретрансляции ячеек, как эволюцию технологии ретрансляции кадров. Главным отличием между ними является то, что Frame Relay использует пакеты переменной длины, а Cell Relay использует пакеты фиксированной длины, которые называются ячейками, и предоставляют ограниченный до минимума заголовок для выполнения контроля. Используя фиксированную длину пакетов в ячейке АТМ, удалось еще сильнее сократить заголовок по сравнению с заголовком пакета. Если Frame Relay обычно предоставляет скорость канала подключения для конечного пользователя к сети до 2 Мбит/с, то АТМ позволяет подключать конечных пользователей на скорости от десятков до сотен Мбит/с.

Эволюция концепций передачи информации с появлением волокна

В последнее десятилетие имеет место мощный технологический прогресс в сфере телекоммуникаций и особенно в области ВОЛС. Это отражается на росте скоростей передачи и увеличении расстояний передающих линий. Главной особенностью ВОЛС является очень низкий уровень помех при очень высокой полосе пропускания.

Протокол X.25 был одним из первых протоколов, использующих принципы пакетной коммутации. Однако чрезмерная сложность протокола и встроенная избыточность передаваемой информации были необходимы, поскольку протокол предназначался для работы в условиях, когда использовались плохие медные линии связи с большим уровнем помех. Но с ростом качества линий связи, каковыми являются ВОЛС, эти свойства протокола становятся рудиментарными.

Главная идея дальнейшего развития принципов пакетной коммутации заключается в том, что функция контроля передаваемых данных совсем не обязательно должна быть приписана всем узлам сети, если этой функцией наделены конечные сетевые устройства [11]. Но в этом случае линия связи должна быть семантически прозрачной, т.е. гарантировать исправную доставку битов, передаваемых от источника в пункт назначения. Именно это и позволяет сделать ВОЛС.

В ранних сетях с коммутацией пакетов (X.25) из-за плохих линий связи качество передачи падало от узла к узлу. Для обеспечения семантической прозрачности требовалась проверка ошибок на каждом сегменте, рис. 5.15 а. Так, например, контроль ошибок, поддерживаемый протоколом HDLC, включает анализ начальных и конечных ограничителей кадра (контроль целостности кадра), контроль ошибок, исправление ошибок и другие функции.

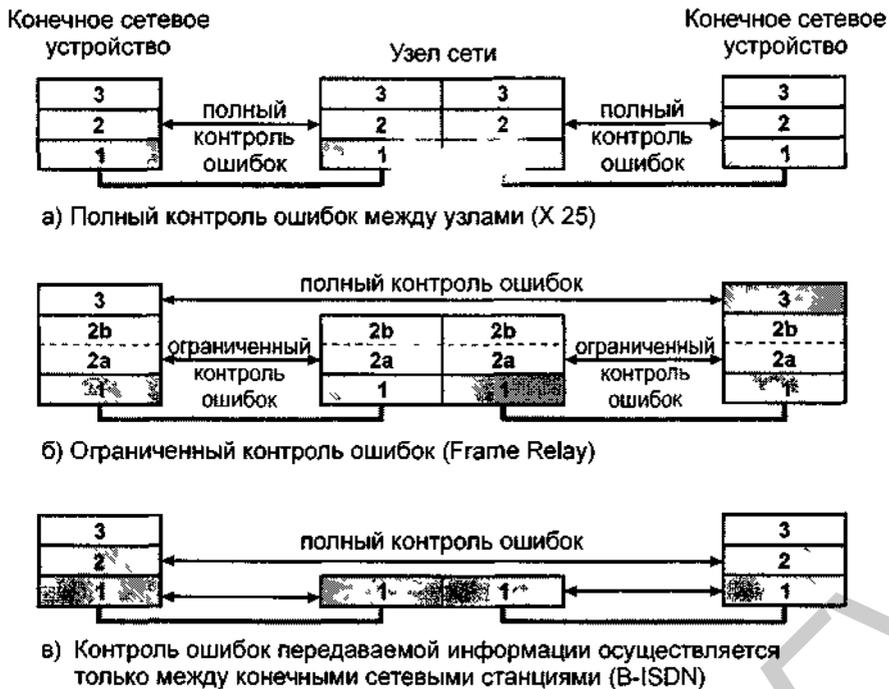


Рис. 5.15. Эволюция концепций передачи информации

В совершенствующейся технологии качество среды передачи и коммутации растут. Таким образом, уменьшается количество ошибок в сети. В протоколе Frame Relay только одна функция – проверка целостности кадра – сохраняется за узлами ретрансляции. Остальные функции переносятся на конечные сетевые устройства, см рис. 5.15 б.

В протоколе широкополосной передачи данных B-ISDN (ATM) эта идея получает дальнейшее развитие. Отпадает функция целостности контроля кадра на узлах. Вся работа переносится на конечные сетевые устройства, а узел коммутации наделяется минимумом сетевых функций, рис. 5.15 в.

5.3. Эталонная модель OSI

Сетевая система конструируется по слоям или уровням. Каждый уровень выполняет определенный набор присущих ему функций. В результате объединения уровней образуется сетевая архитектура. Сетевая архитектура выделяет функции связи по определенным логическим группам – *уровням*, что в значительной степени упрощает стандартизацию. Главной чертой открытой сетевой архитектуры является то, что правила взаимодействия уровней не представляют закрытую информацию или собственность какой-либо организации, а открыты для всеобщего изучения и использования.

Каждый уровень имеет свои определенные правила и процедуры, которые называются *протоколами*. Протоколы регулируют активность в пределах уровня и характер взаимодействия между уровнями. Допускается взаимодействие как между соседними уровнями по вертикали в пределах одного сетевого устройства, так и между однотипными уровнями разных сетевых устройств. В результате этого происходит передача и преобразование данных между уровнями в пределах одного сетевого устройства и между различными сетевыми устройствами. Уровни независимы друг от друга в том смысле, что изменение одного уровня или его внутренних протоколов не влечет изменения протоколов в соседних уровнях.

Разделение на уровни очень удобно и позволяет следующее:

- упростить конструирование сети и структурировать ее функции;
- расширить набор приложений, ориентированных на пользователей сети;
- обеспечить наращивание сети в процессе ее развития

Наибольшую популярность в мире получила открытая сетевая архитектура, использующая в своей основе эталонную модель взаимодействия открытых систем или ЭМВОС (Open Systems Interconnection/Reference Model), или кратко модель OSI (ВОС).

Эта семиуровневая модель была разработана в 1977 г. совместно ISO и ССИТТ (современное название ИТУ-Т) и на сегодняшний день составляет основу для развития международных стандартов в области компьютерных коммуникаций, табл. 5.4 [12].

Таблица 5.4. Уровни модели OSI и их основные функции

Уровень (layer)	Назначение
1 Физический (Physical)	Ответственен за физические, электрические характеристики линии связи между узлами (коаксиальные кабели; витые пары; волоконно-оптические кабели; разъемы, например RJ-45, AUI, DB-9, MIC, ST, SC; повторители; трансиверы и т.д.).
2 Канальный (Data Link)	Обеспечивает надежную передачу данных по физическим линиям связи. На этом уровне (звена данных) происходит исправление ошибок передачи, кодирование и декодирование отправляемых или принимаемых битовых последовательностей. Канальный уровень подразделяется на подуровень Medium Access Control (MAC) – Управление доступом к среде и на подуровень Logical Link Control (LLC) – Управление логическим каналом. Уровень MAC – определяет характер доступа к среде – детерминированный доступ с передачей маркера (Arcnet, Token Ring, FDDI, 100VG AnyLAN) или множественный доступ с распознаванием коллизий (Ethernet – IEEE 802.3). Уровень LLC – верхний подуровень – посылает и получает сообщения с полезными данными.
3 Сетевой (Network)	Обеспечивает для верхних уровней независимость от стандарта передачи данных (прозрачность), оперирует с такими протоколами, как IPX, TCP/IP и др., а также отвечает за адресацию и доставку сообщений.
4 Транспортный (Transport)	Управляет упорядочиванием компонентов сообщений и регулирует входящий поток, если на обработку приходит два или более пакетов одновременно. Дублированные пакеты распознаются этим уровнем и лишние дубликаты фильтруются.
5 Сессионный (Session)	Открывает соединение (сессию или сеанс), поддерживает диалог, т.е. управляет отправкой сообщений туда и обратно, и закрывает сессии. Этот уровень позволяет прикладным программам, работающим на разных сетевых устройствах, координировать свое взаимодействие в рамках отдельных сессий (сеансов).
6 Представительный (Presentation)	Осуществляет преобразования данных из внутреннего числового формата, присущего данному сетевому устройству, в стандартный коммуникационный формат. Примеры: кодирование, сжатие, переформатирование текста.
7 Прикладной (Application)	Предоставляет программисту интерфейс к модели OSI. Примеры: сервер транзакций, протокол FTP, сетевое администрирование.

Уровни с меньшим номером принято называть низкими уровнями, а уровни с большим номером – высокими.

Стандарты IEEE 802

Сетевые протоколы и стандарты, охватывающие два нижних уровня модели OSI (физический и канальный) были разработаны комитетом IEEE 8802 (сокращенно IEEE 802). Получило распространение несколько различных вариантов построения этих уровней. Причем у канального уровня только его нижний подуровень – MAC (управление доступом к среде) – был выделен и объединен с физическим уровнем для организации сетевого стандарта. Таким образом, протоколы подуровня LLC (канального уровня) и более высоких уровней 3, 4 и т.д. остались независимыми от сетевых стандартов.

На рис. 5.16 приведены основные сетевые стандарты IEEE 802. Следует отметить, что стандарт FDDI, несмотря на то, что был разработан другой организацией, также включен в эту группу сетевых стандартов, так как он выполнен в полном соответствии с эталонной моделью OSI/IEEE 802.

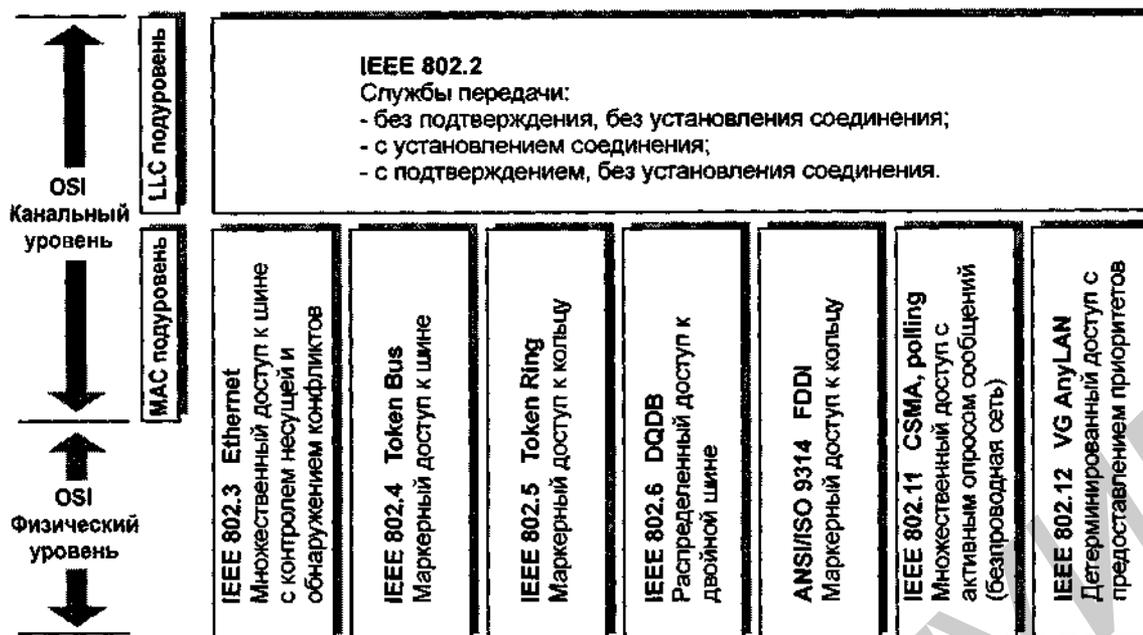


Рис. 5.16. Сетевые стандарты IEEE 802

Причин разработки столь большого числа сетевых стандартов две: первая – обеспечить на сетевом рынке для обычных пользователей менее дорогие сетевые интерфейсы, стоимость которых была бы значительно меньше стоимости настольного ПК; вторая – удовлетворить потребности в скоростной передаче данных, свойственной современным приложениям (например, клиент-сервер) и необходимой при организации сетевых магистралей.

Литература к главе 5

1. Optimux-4E1, Four E1 Channel Multiplexer, RAD Data Communications, 1997
http://www.rad.com/products/family/opt_4e1/opt_4e1.html
2. E1 Quad Fibre Loop Converter and Universal Mounting Chassis – Ordering Information, ADC Telecommunication QFLC, 1997,
http://www.adc.com/Products/FLC_products/E1Quad_specs.html
3. The Fiber Optic Multiplexer FME-H: Up To 6 x E1/T1 Over Fiber, Pan Dacom, 1997,
http://www.pandacom.com/news/tele_p/telecom.html
4. MagnumPlus and Magnum100 Broadband Access Multiplexors, ADC Kentrox, 1998,
<http://www.kentrox.com/products/index.html>
5. MultiHUB – Multifunctional intelligent hub supporting Ethernet, Token Ring, and real-time protocols, Fibronics, 1996, <http://www.fibronics.co.il/fib96/multihub/mhinfo.html>
6. *PremNet Branch – The Power of PremNet in a Smaller Package*, Racal Data Group, 1997,
http://products.rdl.co.uk/nlines1/21f6_1be.htm
7. E. B. Carne. Telecommunications Primer – Signals, Building Blocks and Networks, Prentice Hall PRT, 1995. – 596 p.
8. All-Optical Networking Consortium, WDM Description, 1996,
<http://www.ll.mit.edu/aon/aonWDM.html>
9. M. De Prycker. Asynchronous Transfer Mode: Solution for Broadband ISDN, New York: Ellis Horwood, 1993
10. W. Stallings. Local & Metropolitan Area Networks, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1997. – 605 p.
11. M. De Prycker, R. Peschi, T. Van Landegem. "B-ISDN and the OSI Protocol Reference Model", IEEE Network, March, 1993, pp. 10-18
12. F. Halsall. Data Communications, Computer Networks and Open Systems, Addison-Wesley, 1996. – 907 p.

6. Сети FDDI

FDDI (Fiber Distributed Data Interface) – это стандарт, или, вернее, набор сетевых стандартов, ориентированных, прежде всего, на передачу данных по волоконно-оптическому кабелю со скоростью 100 Мбит/с. Подавляющая часть спецификаций стандарта FDDI была разработана проблемной группой X3T9.5 (ANSI) во второй половине 80-х годов. FDDI стала первой ЛВС, использующей в качестве среды передачи оптическое волокно.

В настоящее время большинство сетевых технологий поддерживают волоконно-оптический интерфейс в качестве одного из вариантов физического уровня, но FDDI остается наиболее отработанной высокоскоростной технологией, стандарты на которую прошли проверку временем и устоялись, а оборудование различных производителей показывает хорошую степень совместимости [1, 2, 3].

При разработке технологии FDDI ставились в качестве наиболее приоритетных следующие цели:

- Повышение битовой скорости передачи данных до 100 Мбит/с;
- Повышение отказоустойчивости сети за счет стандартных процедур восстановления ее после отказов различного рода – повреждения кабеля, некорректной работы сетевого узла, возникновения высокого уровня помех на линии и т.п.;
- Максимально эффективное использование потенциальной пропускной способности сети как для асинхронного, так и для синхронного трафика.

Технология FDDI во многом основывается на технологии Token Ring, развивая и совершенствуя ее основные идеи. У протокола FDDI есть и существенные отличия от Token Ring. Эти отличия связаны с требованиями, которые необходимы для поддержки большой скорости передачи информации, больших расстояний и возможности наряду с асинхронной передачей данных вести синхронную передачу. Два основных отличия в протоколах управления маркером у FDDI и IEEE 802.5 Token Ring следующие [4]:

- в Token Ring станция, передающая кадры, удерживает маркер до тех пор, пока не получит все отправленные пакеты. В FDDI же станция выпускает маркер непосредственно за окончанием передачи кадра (кадров);
- FDDI не использует приоритет и поля резервирования, которые Token Ring использует для выделения системных ресурсов.

В табл. 6.1 указаны основные характеристики сети FDDI.

Таблица 6.1. Основные характеристики сети FDDI

Скорость передачи	100 Мбит/с
Тип доступа к среде	маркерный
Максимальный размер кадра данных	4500 байт
Максимальное число станций	500
Максимальное расстояние между станциями	2 км (многомодовое волокно) 20 км* (одномодовое волокно) 100 м (неэкранированная витая пара UTP Cat.5) 100 м (экранированная витая пара IBM Type 1)
Максимальная длина пути обхода маркера	200 км
Максимальная протяженность сети при кольцевой топологии (периметр)	100 км** (двойное кольцо FDDI)
Среда	Оптическое волокно (многомодовое, одномодовое), витая пара (UTP Cat.5, IBM Type 1)

* Некоторые производители выпускают оборудование на расстояние передачи до 50 км.

** При указанной длине сеть будет продолжать корректно работать и сохранять целостность при появлении единичного разрыва кольца или при отключении одной из станций кольца (режим WRAP) – при этом длина пути обхода маркера не будет превышать 200 км.

6.1. Принцип действия

Классический вариант сети FDDI строится на основе двух волоконно-оптических колец (двойного кольца), световой сигнал по которым распространяется в противоположных направлениях, рис. 6.1 а. Каждый узел подключается на прием и передачу к обоим кольцам. Именно такая кольцевая физическая топология реализует основной способ повышения отказоустойчивости сети. В нормальном режиме работы данные идут от станции к станции только по одному из колец, которое называется первичным (primary). Для определенности направление движения данных в первичном кольце задано против часовой стрелки. Маршрут передачи данных отражает логическую топологию сети FDDI, которая всегда есть кольцо. Все станции, кроме передающей и принимающей, осуществляют ретрансляцию данных и являются сквозными. Вторичное кольцо (secondary) является резервным и в нормальном режиме работы сети для передачи данных не используется, хотя по нему и осуществляется непрерывный контроль за целостностью кольца.

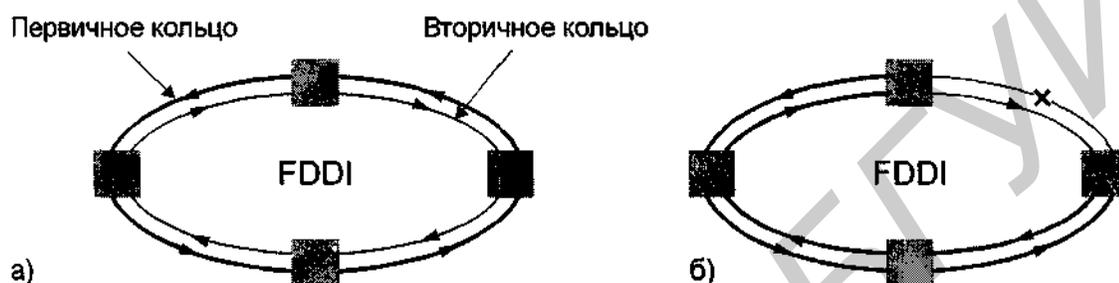


Рис. 6.1. Двойное кольцо FDDI: а) нормальный режим работы; б) режим свернутого кольца (WRAP)

В случае возникновения какого-либо отказа в сети, когда часть первичного кольца не в состоянии передавать данные (например, обрыв кабеля, выход из строя или отключение одного из узлов), для передачи данных активизируется вторичное кольцо, которое дополняет первичное, образуя вновь единое логическое кольцо передачи данных, рис. 6.1 б. Этот режим работы сети называется WRAP, то есть "свертывание" кольца. Операция свертывания производится двумя сетевыми устройствами, находящимися по обе стороны от источника неисправности (поврежденного кабеля, или вышедшей из строя станции/концентратора). Именно через эти устройства происходит объединение первичного и вторичного колец. Таким образом, сеть FDDI может полностью восстанавливать свою работоспособность и целостность в случае единичных отказов ее элементов. При устранении неисправности сеть автоматически переходит в нормальный режим работы с передачей данных только по первичному кольцу.

В стандарте FDDI отводится большое внимание различным процедурам, которые благодаря распределенному механизму управления позволяют определить наличие неисправности в сети, и затем произвести необходимую реконфигурацию. При множественных отказах сеть распадается на несколько не связанных сетей – происходит микросегментация сети.

Работа сети FDDI основана на *детерминированном маркерном доступе к логическому кольцу*. Сначала происходит инициализация кольца, в процессе которой в кольцо одной из станций испускается специальный укороченный пакет служебных данных – *маркер (token)*. После того, как маркер стал циркулировать по кольцу, станции могут обмениваться информацией.

До тех пор, пока нет передачи данных от станции к станции, циркулирует один лишь маркер, рис. 6.2 а, при получении которого станция обретает возможность передавать информацию. В сети FDDI у каждой станции есть *предшествующий сосед (upstream neighbor)* и *последующий сосед (downstream neighbor)*, определяемые ее физическими связями и направлением передачи информации. В классическом варианте это определяется по первичному кольцу. Передача информации организуется в виде пакетов данных длиной до 4500 байт, называемых *кадрами*. Если в момент получения маркера у станции нет данных для передачи, то получив маркер, она немедленно транслирует его дальше по кольцу. При желании передать станция, получив маркер, может удерживать его и вести соответственно передачу кадров в течение времени, называемого *временем удержания маркера THT (token holding time)*

(рис. 6.2 б). После истечения времени ТНТ станция обязана завершить передачу своего очередного кадра и передать (отпустить) маркер последующей станции, рис. 6.2 в. В любой момент времени передавать информацию может только одна станция, а именно та, которая захватила маркер.

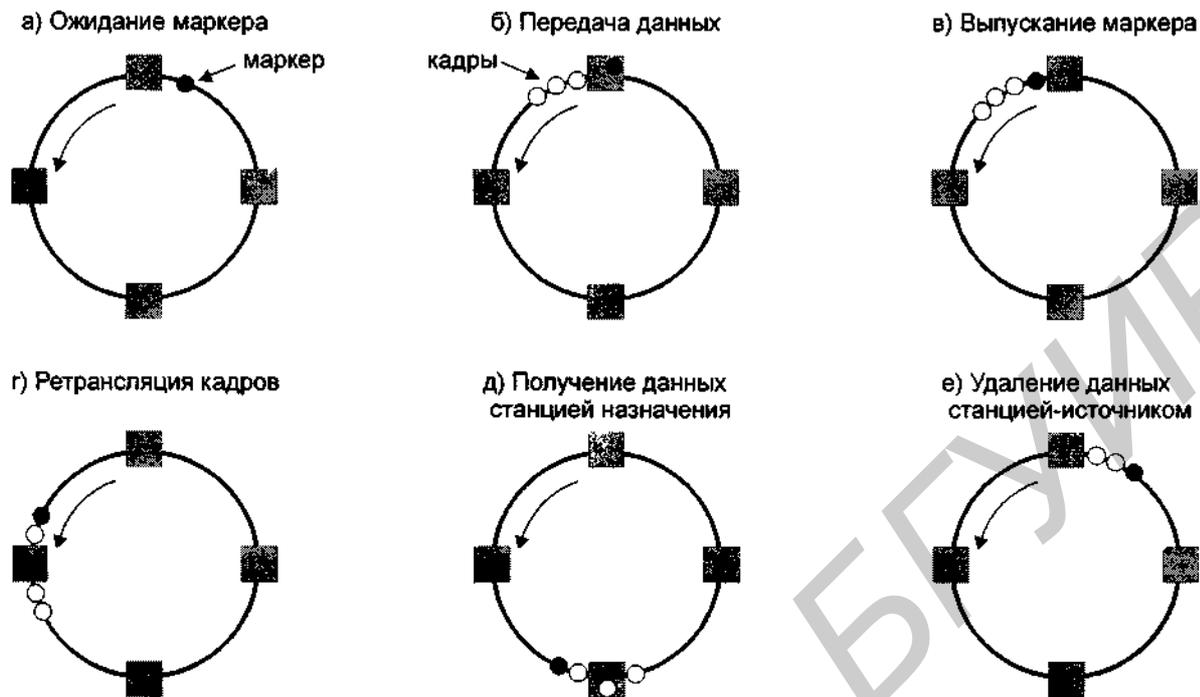


Рис. 6.2. Передача данных

Каждая станция сети читает адресные поля получаемых кадров. В том случае, когда *собственный адрес станции* – MAC адрес – отличен от поля адреса получателя, станция просто ретранслирует кадр дальше по кольцу, рис. 6.2 г. Если же собственный адрес станции совпадает с полем адреса получателя в принимаемом кадре, станция копирует в свой внутренний буфер данный кадр, проверяет его корректность (по контрольной сумме), передает его поле данных для последующей обработки протоколу вышестоящего уровня (например, IP), а затем передает исходный кадр по сети последующей станции (рис. 6.2 д), предварительно проставив три признака в *специальных полях кадра*: распознавания адреса, копирования кадра и отсутствия или наличия в нем ошибок.

Далее кадры, транслируясь от узла к узлу, возвращаются к исходной станции, которая была их источником. *Станция-источник* для каждого кадра проверяет признаки кадра, дошел ли он до станции назначения и не был ли при этом поврежден, и если все нормально, ликвидирует этот кадр (рис. 6.2 е), освобождая ресурсы сети, или, в противном случае, пытается осуществить повторную передачу. В любом случае функция удаления кадра возлагается на станцию, которая была его источником.

Маркерный доступ – это одно из наиболее эффективных решений. Благодаря этому реальная производительность кольца FDDI при большой загрузке достигает 95%. Для примера, производительность сети Ethernet (в рамках коллизийного домена) с ростом загрузки достигает 30% от пропускной способности.

Форматы маркера и кадра FDDI, процедура инициализации кольца, а также вопросы распределения ресурсов сети в нормальном режиме передачи данных рассмотрены в п. 6.7.

6.2. Составляющие стандарта FDDI

Составляющие уровни стандарта FDDI и основные функции, выполняемые этими уровнями, приведены на рис. 6.3.

Как и многие другие технологии локальных сетей, технология FDDI использует протокол 802.2 подуровня управления каналом данных (LLC), определенный в стандартах IEEE 802.2, и ISO 8802.2. FDDI использует первый тип процедур LLC, при котором узлы работают в дейтаграммном режиме – без установления соединений и без восстановления потерянных или поврежденных кадров.

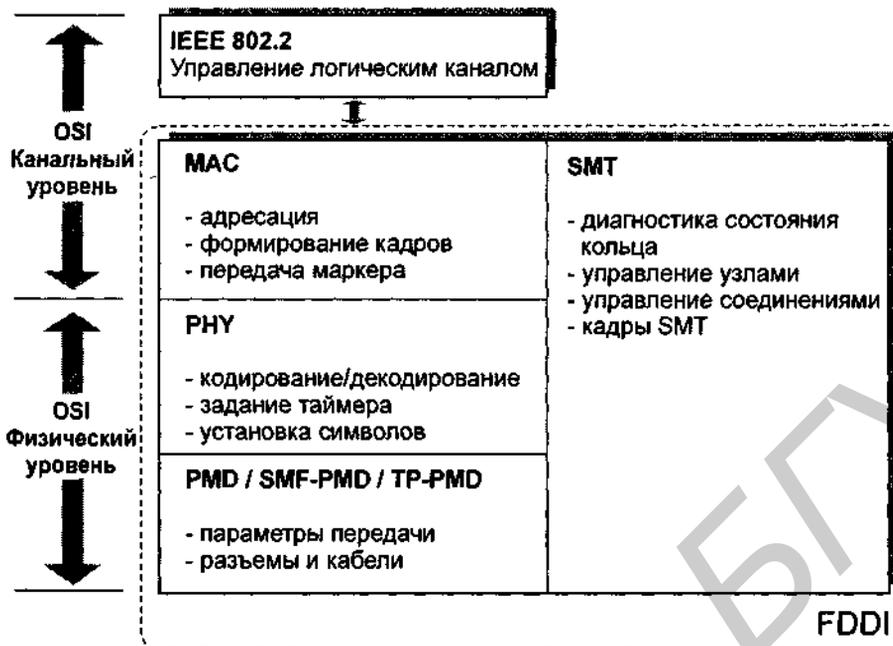


Рис. 6.3. Составляющие стандарта FDDI

Первоначально (к 1988 году) стандартизованы были следующие уровни (наименования соответствующих документов ANSI / ISO для FDDI приведены в табл. 6.2):

- **PMD** (physical medium dependent) – нижний подуровень физического уровня. Его спецификации определяют требования к среде передачи (многомодовый волоконно-оптический кабель) к оптическим приемопередатчикам (допустимую мощность и рабочую длину волны 1300 нм), максимальное допустимое расстояние между станциями (2 км), типы разъемов, функционирование оптических обходных переключателей (optical bypass switches), а также представление сигналов в оптических волокнах.
- **PHY** (physical) – верхний подуровень физического уровня. Он определяет схему кодирования и декодирования данных между MAC-уровнем и уровнем PMD, схему синхронизации и специальные управляющие символы. В его спецификации входит: кодирование информации в соответствии со схемой 4B/5B; правила тактирования сигналов; требования к стабильности тактовой частоты 125 МГц; правила преобразования информации из параллельной формы в последовательную.
- **MAC** (media access control) – уровень управления доступом к среде. Этот уровень определяет: процессы управления маркером (протокол передачи, правила захвата и ретрансляции маркера); формирование, прием и обработку кадров данных (их адресацию, обнаружение ошибок и восстановление на основе проверки 32-разрядной контрольной суммы); механизмы распределения полосы пропускания между узлами.
- **SMT** (station management) – уровень управления станцией. Этот специальный всеобъемлющий уровень определяет: протоколы взаимодействия этого уровня с уровнями PHY, PMD и MAC; управление станциями и концентраторами; процессы инициализации кольца и контроль за соединениями между узлами; обработку аварийных ситуаций (алгоритмы обнаружения ошибок и восстановления после сбоев).

Позже (1993-1994 гг.) к спецификациям уровня PMD добавляются новые спецификации, стандартизирующие два других интерфейса, соответственно на одномодовое волокно и витую пару¹:

- **SMF-PMD (Single Mode Fiber PMD)** – нижний подуровень физического уровня, предполагающий использование лазерных передатчиков и одномодового оптического волокна.
- **TP-PMD (Twisted Pair PMD)**. Подкомитетом ANSI в 1994 году была завершена разработка нового стандарта FDDI TP-PMD. Этот стандарт предусматривает использование незранированной витой пары категории 5 (UTP Cat.5) с соединителями RJ-45 (CDDI или FDDI на медном кабеле), а также экранированной витой пары (STP IBM Type 1) с соединителями DB-9 (SDDI). Максимальное расстояние по медному кабелю в обоих случаях не должно превосходить 100 метров.

Таблица 6.2. Основные стандарты ANSI/ISO для FDDI [5]

Стандарт FDDI		Спецификация ANSI / ISO
PMD	MMF-PMD	ISO 9314-3:1990 / ANSI X3.166:1990
	SMF-PMD	ANSI X3.184:1990
	TP-PMD	ANSI X3T9.5 TBD:1994
PHY		ISO 9314-1:1989 / ANSI X3.148:1988
MAC		ISO 9314-2:1989 / ANSI X3.139:1987
SMT		ANSI X3T9.5/84-49:1992, rev 7.3

6.3. Типы устройств и портов

Все узлы сети FDDI можно классифицировать по трем признакам: функциям обработки данных (конечная станция, концентратор); типу подключения; количеству встроенных MAC-узлов [1, 6].

По функциям обработки данных все устройства FDDI делятся на станции и концентраторы. В качестве **станции** может выступать рабочая станция или файл-сервер с соответствующим FDDI адаптером. **Концентратор** – это активное устройство, которое выполняет функцию объединения и позволяет подключить к себе несколько рабочих станций или других концентраторов.

По типу подключения различают следующие устройства FDDI:

- **DAS** (dual attachment station) – **станция двойного подключения**. Это устройство имеет два порта (которые принято обозначать **A** и **B**) и предназначено для непосредственного подключения в двойное кольцо FDDI и подсоединяется на прием и на передачу к первичному и вторичному кольцу. Роль DAS может выполнять рабочая станция или файл-сервер с соответствующим FDDI DAS адаптером.
- **SAS** (single attachment station) – **станция одиночного подключения**. Это устройство (рабочая станция или файл-сервер) имеет один порт **S** и может подключаться в кольцо FDDI только через FDDI-концентратор.
- **DAC** (dual attachment concentrator) – **концентратор двойного подключения**. Это устройство имеет два порта **A** и **B**, а также несколько портов **M**, и предназначено для непосредственного подключения в двойное кольцо. К **M**-портам могут подключаться другие сетевые устройства.
- **SAC** (single attachment concentrator) – **концентратор одиночного подключения**. Это устройство имеет один порт **S** и несколько портов **M**. SAC не допускает непосредственного подключения к двойному кольцу.
- **NAC** (null attachment concentrator) – **концентратор нулевого подключения**. Это устройство имеет только **M**-порты.

Соответственно определения четырех типов портов FDDI: **A**, **B**, **M** и **S** приводятся ниже.

¹ Часть прежних спецификаций, относящихся к интерфейсу на многомодовое волокно, далее будем называть MMF-PMD.

- Порт **A**, входящее первичное, выходящее вторичное кольцо PI/SO (primary in/ secondary out) – составляет неотъемлемую часть станции с двойным подключением DAS или концентратора с двойным подключением DAC и присутствует, как правило, в единичном экземпляре. Через этот порт устройство соединяется с входящим первичным кольцом и уходящим вторичным кольцом двойного кольца FDDI.
- Порт **B**, выходящее первичное, входящее вторичное кольцо PO/SI (primary out/ secondary in) – составляет неотъемлемую часть DAS или DAC и присутствует, как правило, в единичном экземпляре. Через этот порт устройство соединяется с уходящим первичным кольцом и входящим вторичным кольцом двойного кольца FDDI.
- Порт **M** – master, первичное входящее, первичное выходящее PI/PO (primary in/ primary out) – составляет неотъемлемую часть любого FDDI концентратора (NAC, DAC, SAC). Обычно бывает несколько **M**-портов на одном концентраторе. Через этот концентратор порт может соединять концентратор с DAS, DAC (о последних говорят, что они подключаются по механизму Dual Homing через свои порты **A** и **B**), а также со станцией одиночного подключения SAS или концентратором одиночного подключения SAC, у которого используется его порт **S**. Если сеть FDDI основывается на двойном кольце, то этот порт в нормальном режиме работы использует только первичное кольцо.
- Порт **S** – slave, PI/PO – присутствует у SAS и SAC. Через этот порт SAS или SAC соединяет с концентратором. Если сеть основывается на двойном кольце, то этот порт в нормальном режиме работы использует только первичное кольцо.

Правила подключения портов между собой указаны в табл. 6.3. Подробные комментарии по правилам подключения портов A и B устройств DAS и DAC между собой и другими портами даны в табл. 6.4, а по правилам подключения портов S и M между собой и с другими портами – в табл. 6.5.

Таблица 6.3. Правила подключения портов FDDI

		Порты других устройств				Обозначения: V – допустимое соединение X – недопустимое соединение N – требуется уведомление SMT VP – допустимое соединение, но может быть как активным, так и неактивным (например, при Dual Homing).
		A	B	S	M	
Порты данного устройства	A	V, N	V	V, N	VP	
	B	V	V, N	V, N	VP	
	S	V, N	V, N	V	V	
	M	V	V	V	X	

Число встроенных MAC. Для того, чтобы иметь возможность передавать собственные данные в кольцо или принимать данные (а не просто ретранслировать данные других станций), станция должна иметь в своем составе хотя бы один MAC-узел, который имеет свой уникальный MAC-адрес. Станции могут не иметь ни одного узла MAC, и, значит, участвовать только в ретрансляции чужих кадров. Но обычно все станции сети FDDI, даже концентраторы, имеют хотя бы один MAC-узел. Концентраторы используют MAC-узел для захвата и генерации служебных кадров, например, кадров инициализации кольца, кадров поиска неисправности в кольце и т.п.

Станции (или концентраторы), которые имеют один MAC-узел, называются SM (single MAC) станциями, а станции, которые имеют два MAC-узла, называются DM (dual MAC) станциями. Благодаря второму MAC-узлу, станция может работать в полнодуплексном режиме. Если все устройства DAS и DAC двойного кольца имеют по два MAC-узла, то вторичное кольцо может также использоваться для передачи данных. Общая пропускная способность увеличивается до 200 Мбит/с. Если происходит повреждение кабельной системы кольца, то происходит свертывание колец и скорость падает до 100 Мбит/с – в этой ситуации один MAC-узел на каждой станции будет простаивать. Пожалуй, это основная причина, по которой Dual MAC устройства получили меньшее распространение.

Таблица 6.4. Детали подключения портов А и В (для DAS и DAC)

Порт-Порт	Правила и действия
А-В и В-А	Правильное соединение. Статус портов будет "peer" – точка-точка, а устройство устанавливается в рабочую моду THRU.
А-М и В-М	Соединение допускается, если станция может поддерживать механизм Dual-Homing. Если физическая связь у обоих соединений исправна, то на этапе низкоуровневой сигнализации соединение А-М будет автоматически отключено в пользу соединения В-М . Статус портов будет "tree" – дерево. Мода THRU отключается.
А-S или В-S	Соединение возможно, но не желательно. Если же такое соединение возникает, то оно приводит к свертыванию кольца (мода WRAP). Статус порта устанавливается в состояние "peer".
А-А или В-В	Соединение возможно, но не желательно. Такое соединение приводит к перекручиванию первичного и вторичного колец. И хотя это не фатально, система управления SMT об этом будет информировать. Статус порта устанавливается в состояние "peer".
А-М и В-А	Результат такого соединения не регламентируется стандартом FDDI. Допустимы два варианта поведения. Первый – станция принимает соединение В-А (состояние порта "peer") и не принимает соединение своего порта А с М -портом другого устройства. Таким образом, эта станция осуществляет свертывание кольца (мода WRAP) через свой В -порт. Другой вариант поведения, когда станция не принимает соединение В-А , а принимает соединение А-М . В такой ситуации она подобна станции, подключенной по Dual Homing, работающей не в основном, а в резервном варианте. Статус порта А устанавливается в состояние "tree".

Таблица 6.5. Детали подключения портов S и M

Порт-Порт	Правила и действия
S-М и М-S	Правильное соединение при построении структуры типа "дерево". Статус портов устанавливается в состояние "tree".
S-S	Правильное соединение (хотя и не позволяет добавить ни одного дополнительного устройства), создающее одиночное кольцо двух станций SAS. Статус портов будет "peer".
М-М	Недопустимое соединение, создающее топологию "дерево колец", которая не реализуется в стандарте FDDI. Такое соединение отвергается с обеих сторон. Статусы портов устанавливаются в состояние "none".
S-А или S-В	Допустимое соединение, но не желательное, так как создает свернутое двойное кольцо (если другая станция находилась в двойном кольце). Если же другая станция оставшимся портом (А или В) подключена к М -порту (т.е. реализуется структура дерева), то от того, как реализована производителем (этой другой станции) политика выбора активного соединения, зависит, будет ли исходная станция подключена в кольцо или нет. По причине неопределенности такую конфигурацию лучше не допускать.

На рис. 6.4 показаны некоторые возможные варианты подключения различных сетевых устройств.

"Блуждающий" MAC. Когда новая станция включается в сеть FDDI, то сеть на время приостанавливает свою работу, проходя через процесс инициализации кольца, в течение которого между всеми станциями согласуются основные параметры кольца, самым важным из которых является номинальное время оборота маркера по кольцу TTRT. Если количество станций в сети велико, то частая реинициализация кольца, связанная с отключением или добавлением станций (преимущественно SAS, подключенных к **М**-портам) может приводить к потере данных и задержкам. Процедуры инициализации в некоторых случаях можно избежать. Примером такого случая является подключение новой станции SAS к порту **М** концентратора с так называемым *блуждающим узлом* MAC (roving MAC), который также называют локальным

MAC-узлом. Наличие блуждающего MAC-узла, наряду с основным MAC-узлом, позволяют концентратору добавлять и отключать станции на M-портах без прекращения работы двойного кольца [6].

Если к M-порту DAC, имеющего roving MAC, подключается действующее дерево через свой корень, например, порт S концентратора SAC, то один маркер должен быть уничтожен, поскольку образовалась одна единая сеть, вместо двух независимых. Roving MAC иногда (зависит от производителя и от параметров подсетей) способен выполнить такую задачу без повторной инициализации в каждой из подсетей. Для этого узел roving MAC задерживает один из маркеров до момента прихода второго маркера на концентратор, после чего выполняется процедура объединения двух сетей в одно логическое кольцо, и выпускается в него только один маркер.

Стандартом FDDI строго не регламентирован механизм работы блуждающего MAC. Поэтому последний не получил большого распространения в FDDI концентраторах.

Топологии сетей FDDI

Единственным видом локального соединения в стандарте FDDI является соединение "точка-точка". Соединение "точка-точка" позволяет разным участкам кольца иметь свои особенности. Например, один участок кольца может использовать одномодовое волокно, другой – многомодовое, третий – витую пару. Оптическое волокно, плохо адаптируемое в качестве использования общей шины, выгодно подходит под конфигурацию "точка-точка".

Наряду с этим, сеть обладает также определенной топологией, определяющей структуру всей сети как единого целого. Различают логическую и физическую топологию. *Логическая топология* дает представление о пути, по которому двигаются данные от станции к станции. *Физическая топология* показывает естественное размещение сетевых устройств (станций, концентраторов), а также кабельной системы, посредством которой устанавливается физическая связь между сетевыми устройствами. Если логическая топология сети FDDI всегда есть кольцо, то физическая топология может быть разнообразной.

Ниже рассмотрены пять основных вариантов физической топологии: точка-точка, двойное кольцо; отдельный концентратор; дерево концентраторов; двойное кольцо деревьев; а также возможность дополнительного повышения надежности работы станции при помощи механизма Dual Homing.

Точка-точка, рис. 6.4 а. Это – простейшая допустимая физическая топология, при которой связываются между собой две станции FDDI типа SAS. В зависимости от того, какой интерфейс поддерживают сетевые адаптеры, связь может быть как на основе BOK, так и витой пары.

Двойное кольцо, рис. 6.4 б. Двойное кольцо образуется соединениями "точка-точка" между рабочими станциями (DAS), причем каждое такое соединение осуществляется по паре оптических волокон (или витой парой), по которым свет распространяется в разных направлениях, рис. 6.4 а. Топология двойного кольца удобна и наиболее часто применяется в тех случаях, когда имеется небольшое число станций с двойным подключением, которые нужно связать в единую сеть.

Но так как каждая станция в такой топологии составляет неотъемлемую часть кольца, их функционирование становится критичным для работы всей сети. Устранение или добавление станций невозможно без повторной инициализации кольца. Отключение питания на станции (обрыв в сегменте кабельной системы) приводит к разрушению двойного кольца, хотя после процесса реконфигурации целостность сети восстанавливается, рис. 6.1 б. При этом образуется новое свернутое логическое кольцо, по которому циркулирует маркер. С увеличением числа неисправных линий связи (числа выключенных или неисправных станций) сеть распадается на отдельные сегменты. В каждом сегменте происходит нормальное функционирование сети, но связь между сегментами отсутствует. Использование оптических обходных переключателей позволяет сохранить целостность кольца – в случае отключения питания DAS оптический обходной переключатель позволяет обойти эту станцию и сохранить топологию двойного кольца (см. п. 6.4), причем сохраняется передача маркера и данных только по первичному кольцу.

По этой причине двойное кольцо в чистом виде используется тогда, когда риск пользователей, связанный с выходом DAS станций из строя, невелик. Такая топология возможна в тех случаях, когда в сеть нужно объединить небольшое число рабочих станций и нет необходимости прибегать к более дорогостоящему FDDI концентратору.

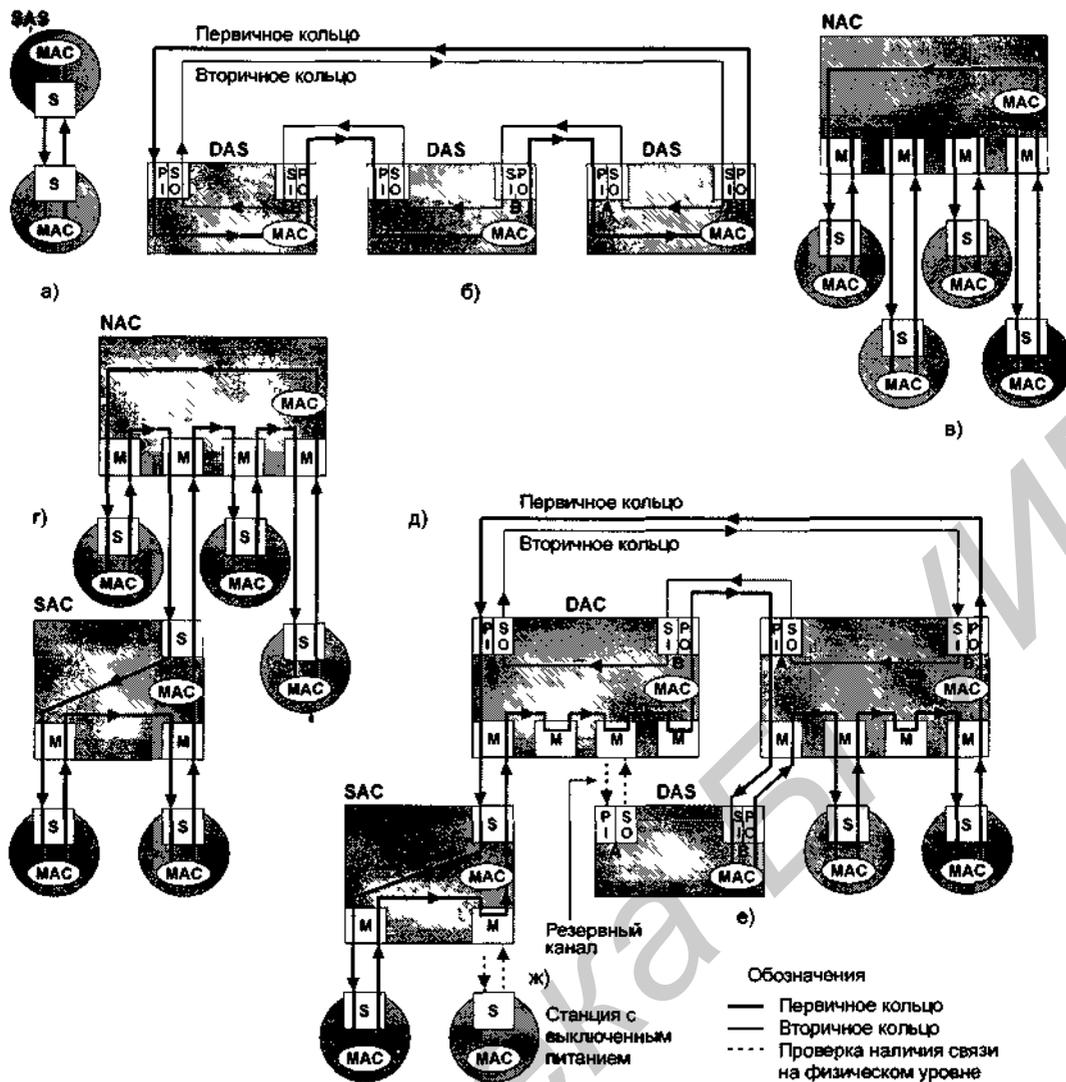


Рис. 6.4. Возможные варианты подключения различных устройств в сети FDDI

Отдельный концентратор, рис. 6.4 в. При этой топологии используется только один FDDI концентратор типа NAC, который не подключается к двойному кольцу, и имеет внутреннюю FDDI шину (backplane). К M-портам концентратора могут подключаться как SAS, так и DAS станции. DAS может быть подключена одним из своих портов (A/B) к одному из M-портов концентратора, или обоими портами к любым двум M-портам концентратора – в последнем случае реализуется механизм подключения Dual Homing.

Дерево концентраторов, рис. 6.4 г. В этой топологии концентраторы связываются в иерархическую звездную топологию с одним концентратором (NAC) в корне дерева (рис. 6.4 в). От корневого концентратора идут связи к станциям (SAS и DAS) и/или к другим концентраторам (SAC и DAC). Эта топология предусматривает большую гибкость в отношении добавления и удаления FDDI станций и концентраторов и позволяет изменять их положение без разрыва сети FDDI.

Преимущества этой топологии:

- Удобна, когда нужно объединить большое количество станций в пределах одного здания или в пределах одного этажа здания;
- Администратору сети легко контролировать сетевые устройства конечных пользователей и ограничивать их доступ к определенным ресурсам сети, используя функции концентратора;
- При выходе из строя и выключении станции концентратор автоматически отключит ее от сети.

Двойное кольцо деревьев, рис. 6.4 д. В этой топологии сеть образована иерархически-ми деревьями, в корнях которых находятся концентраторы, непосредственно подключенные к двойному кольцу (DAC). В кольцо могут быть также подключены рабочие станции DAS. Физическое кольцо образуется соединениями "точка-точка" между DAS и DAC. Корневые концентраторы образуют кольцевую магистраль FDDI и, таким образом, являются ключевыми для работы всей сети. К этим концентраторам могут быть подключены другие концентраторы SAC или DAC, а также станции SAS или DAS, и т.д.

Двойное кольцо деревьев – это наиболее универсальная и гибкая топология, охватывающая в себе все преимущества технологии FDDI. Двойное кольцо деревьев позволяет создать огромную и сложную сеть, которая благодаря резервному кольцу будет сохранять целостность при повреждении линии связи кольца или при отключении станции или концентратора из кольца. Дополнительно для повышения надежности возможно подключение концентраторов или станций двойного кольца через оптический обходной переключатель.

Dual Homing, рис. 6.4 е. Правила FDDI позволяют создавать топологию с повышенной надежностью, при которой станция с двойным подключением DAS (или концентратор с двойным подключением DAC), не включенная непосредственно в двойное кольцо, может одновременно подключаться своими портами А и В к М-портам других концентраторов сети FDDI. Механизм, обеспечивающий такую надежность, называется *Dual Homing*.

В нормальном состоянии активизируется канал связи по порту В, через который DAS (DAC) устройство объединяется в логическое кольцо сети. При этом канал связи от порта А находится в состоянии ожидания, и готов сразу же автоматически активизироваться, если сегмент от порта В претерпит разрыв.

Избыточная топология полезна в тех случаях, когда есть риск повреждения кабельной системы, а потребность в непрерывной связи станции с сетью велика, например, в банках, в крупных финансовых учреждениях, на объектах повышенного технологического риска.

Другое преимущество – это простота установки связи между рабочими станциями на межсетевом уровне.

6.4. Оптический обходной переключатель

При отключении питания SAS станции соответствующий М-порт концентратора, к которому станция подключена, сразу же заметит это средствами физического уровня. Далее по команде уровня SMT концентратора выполняется электронный обход этого М-порта, в результате чего восстанавливается логическое кольцо, рис. 6.4 ж. Заметим, что свертывания двойного кольца, к которому подключен концентратор, не происходит.

Если же отключить питание у станции DAS или концентратора DAC, то сеть, хотя и продолжит работу, сохранив единство, перейдет в состояние WRAP. Запас отказоустойчивости будет утерян, что нежелательно. Теперь при отключении еще одной станции кольца будет происходить сегментация сети, рис. 6.5. Поэтому для устройств с двойным подключением рекомендуется использовать оптический обходной переключатель OBS (optical bypass switch), который позволяет замкнуть входные и выходные оптические волокна и обойти станцию (или концентратор) в случае ее (его) выключения. Оптический обходной переключатель питается от DAS (DAC) и состоит в простейшем случае из отражающих зеркал или подвижного оптоволоконного. При отключенном питании такой переключатель осуществляет перекоммутацию каналов, в результате чего оптический сигнал обходит станцию, а при включении ее питания вновь соединяет входы портов А и В с внутренними схемами PHY станции.

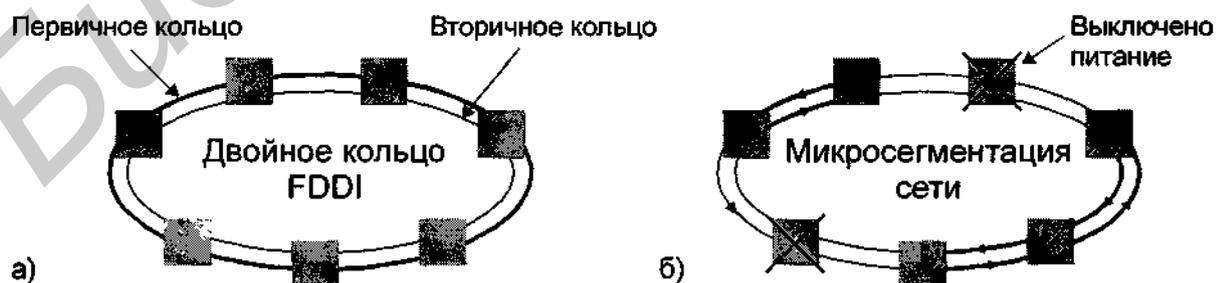


Рис. 6.5. Микросегментация двойного кольца при отключении двух станций

Подключение к сети через OBS

Оптический обходной переключатель служит для дополнительного повышения надежности и целостности двойного кольца FDDI. Сетевые станции или концентраторы подключаются к двойному кольцу через OBS (рис. 6.6).

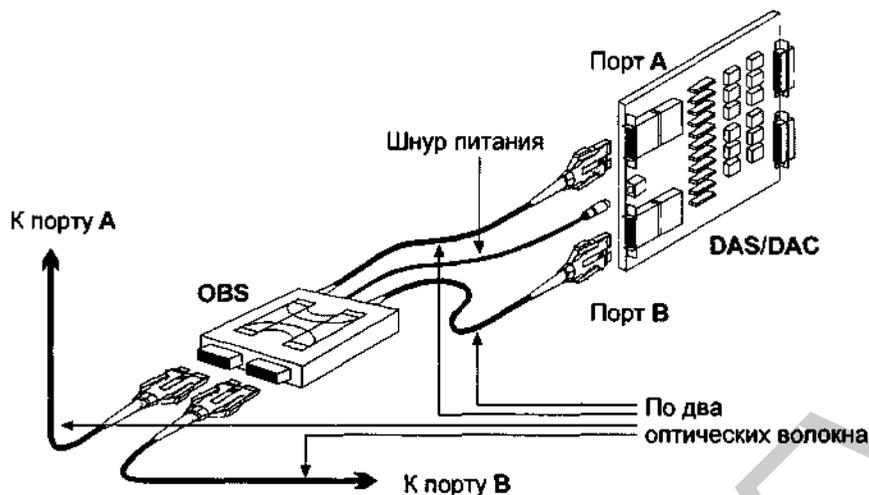


Рис. 6.6. Схема подключения оптического обходного переключателя (OBS)

Принцип работы оптического переключателя показан на рис. 6.7. В рабочем состоянии оптический переключатель имеет напряжение питания 5 В. Он получает питание от соответствующей рабочей станции (концентратора) двойного подключения. При выходе из строя или при отключении питания станции, подключенной к двойному кольцу через OBS, происходит двухэтапный процесс реконфигурации сети:

- на первом этапе осуществляется исключение неисправной станции или концентратора из кольца (оптический переключатель механически переходит из рабочего состояния (рис. 6.7 а) в свое нормальное (байпасовое) состояние с выключенным питанием (рис. 6.7 б), замыкая двойное кольцо через себя. Для оптического переключателя фирмы AMP время срабатывания $t_{\max} < 10$ мс [7];
- на втором этапе вновь инициализируется маркерное кольцо FDDI. Время реинициализации может варьироваться в пределах от 10 до 150 мс в зависимости от протяженности сети и количества станций.

Из-за больших потерь на излучение, которые вносит оптический переключатель (при использовании многомодового волокна с затуханием 1 дБ/км (длина волны 1300 нм) в зависимости от производителя OBS – стандартом FDDI PMD определено допустимое значение вносимого затухания на OBS до 2,5 дБ), число последовательно подключенных оптических переключателей ограничено четырьмя, даже если длины сегментов ВОК небольшие. Это связано с тем, что из-за большого числа последовательных точек коммутации в кабельной системе потери накапливаются (рис. 6.7 в). Желательно, чтобы запас по мощности был не меньше 2-3 дБ, так как со временем, по мере эксплуатации, вносимые потери в самом оптическом волокне и на сухих стыках (в местах терминирования) могут возрастать.

Для примера приведем расчет типовой конфигурации с одним OBS. Пусть дано: полная длина многомодового ВОК – 2 км, в некоторой промежуточной точке подключена станция через OBS, число разъемных соединений – 4 (на оптических распределительных панелях). С учетом того, что бюджет линии (полное максимальное допустимое затухание в линии) в соответствии со стандартом составляет 11 дБ, потери в ВОК – 1 дБ/км, а потери на каждом разъеме – 0,3 дБ, вычислим запас:

	Типовые значения затухания, дБ	После длительной эксплуатации, дБ
Затухание в кабельной системе	3,0	3,5
Потери на оптических соединителях	1,2	2,8
Потери на OBS (производства AMP)	1,1	2,1
Всего потери	5,3	8,4
Запас	4,7 (11-5,3)	2,6 (11-8,4)

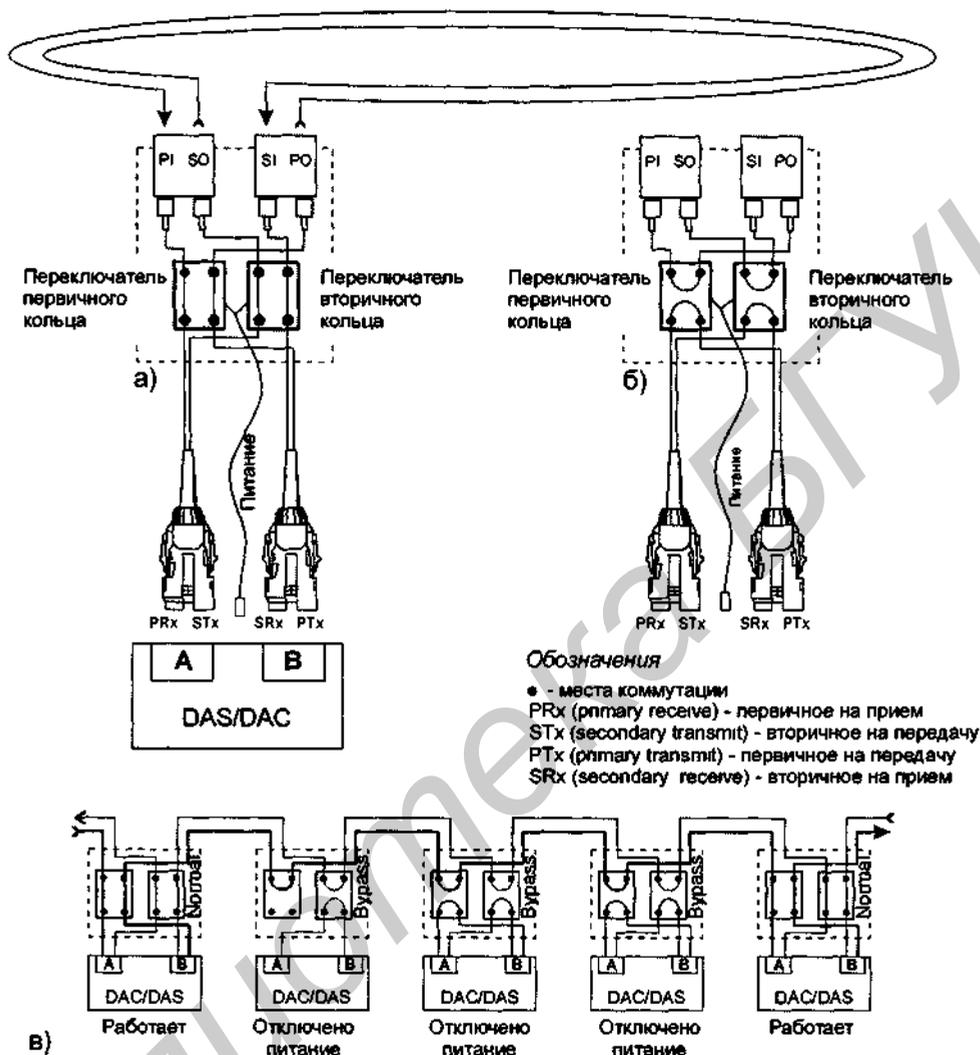


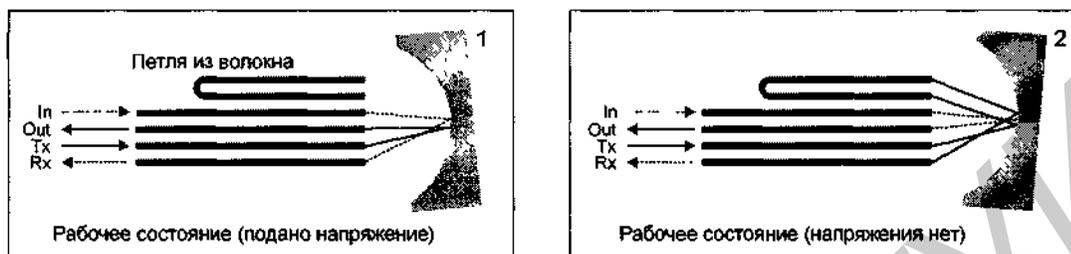
Рис. 6.7. Принцип работы оптического переключателя:
 а) рабочее состояние; б) байпасовое состояние;
 в) накопление оптических потерь в местах коммутации
 последовательных OBS с выключенным питанием

Устройство OBS

Существует несколько различных технологий механо-оптического переключения: с использованием поворотных призм, поворотных зеркал или подвижных волокон. Поскольку диаметр волокна очень мал, необходимо использовать прецизионные методы, позволяющие контролировать пути световых лучей.

Рассмотрим механо-оптическое переключение световых потоков посредством поворотных зеркал. Два волокна размещаются таким образом, чтобы их торцевые поверхности были

равноудалены от центра кривизны сферического зеркала. Свет, выходя из одного волокна, падает на зеркало и отражается, попадая в другое волокно. Отраженный световой конус является копией падающего конуса благодаря сферичности зеркала. А поскольку точка излучения и точка приема равноудалены от центра кривизны зеркала, то такую технологию называют *оптикой центрo-симметричного отражения*. Эта технология обеспечивает очень высокую стабильность и рассчитана на пожизненную эксплуатацию (до миллиона циклов коммутации). Волокна помещаются в прецизионные крепления вдоль одной плоскости (рис. 6.8). Ось вращения поворотного сферического зеркала устанавливается строго перпендикулярно этой плоскости. Когда зеркало находится в положении 1, входящий в OBS свет отражается в волокно, идущее к станции. Когда зеркало разворачивается в положение 2, входящий свет отражается в байпасовое волокно.



Обозначения:

In - входящий сигнал в OBS из кольца FDDI

Out - выходящий сигнал из OBS в кольцо FDDI

Tx - входящий сигнал в OBS от передатчика станции

Rx - выходящий сигнал из OBS, далее идущий на приемник станции

Рис. 6.8. Схема работы OBS, использующего поворотное зеркало (по материалам фирмы AMP [7])

Наряду с фирмой AMP многомодовые OBS производятся фирмами DiCon [8], Molex [9], NetOptics [10].

Производство одномодовых переключателей более сложное. Из-за значительно меньшего диаметра сердцевины одномодового волокна очень трудно достичь небольших вносимых потерь при изготовлении одномодовых OBS. Сложность изготовления приводит к их высокой стоимости (в 3-4 раза выше по сравнению с многомодовыми OBS) и небольшому числу производителей, среди которых можно отметить NetOptics, рис. 6.9.

Приведем некоторые характеристики одномодового OBS, производимого этой фирмой:

- Рабочая длина волны 1280-1650 нм
- Вносимые потери 1,3 дБ (типичные) и 2,5 дБ (максимум)
- Напряжение питания +5 В (DC)
- Время срабатывания 50 мс
- Температура окружающей среды от 0° С до + 50° С.

Общий вид одномодового OBS фирмы NetOptics приведен на рис. 6.9.

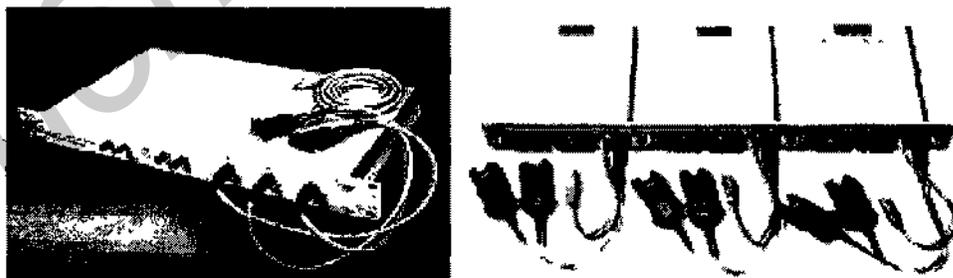


Рис. 6.9. Общий вид одномодового OBS для сетей FDDI (по материалам фирмы NetOptics [10])

6.5. Кабельная система и уровень PMD

Разделение физического уровня FDDI на два подуровня PMD и PHY главной целью стало сделать более ясной структуру стандарта. Это также позволило стандартизировать различные физические интерфейсы, модифицируя нижний подуровень PMD и не трогая верхний подуровень PHY (рис. 6.3). Далее рассмотрены стандарты уровня PMD применительно к трем различным физическим интерфейсам: на многомодовое волокно, на одномодовое волокно, и на витую пару.

Стандарты MMF-PMD, SMF-PMD и TP-PMD

Данные, прежде чем передаваться от одной станции к другой, должны преобразовываться в определенные битовые последовательности, которые затем распространяются по кабельной системе. Стандарт уровня PMD (далее просто стандарт PMD) охватывает те области, которые непосредственно связаны с физической передачей данных: оптическую и электрическую передачу и прием данных, технические требования к волоконно-оптическому и медному кабелю, оптические соединители, оптические переключатели. Сравнительные характеристики трех основных стандартов PMD приведены в табл. 6.6.

FDDI стандарты MMF-PMD и SMF-PMD устанавливают основные оптические характеристики волоконно-оптической кабельной системы, среди которых: длина волны оптического передатчика, тип кабеля (оптическое волокно), затухание (величина энергетических потерь) в кабеле и другие, табл. 6.6.

В качестве базовой кабельной системы в стандарте FDDI принят волоконно-оптический кабель на основе градиентного многомодового оптического волокна с диаметром 62,5/125 мкм. Допускается волокно с диаметром 50/125 мкм. Ступенчатое многомодовое волокно из-за его низкой полосы пропускания не удовлетворяет требованиям стандарта PMD. Длина волны излучения 1300 нм. Минимальное допустимое значение мощности оптического сигнала на входе станции в стандарте PMD составляет -31 дБм. В этом случае вероятность ошибки на один бит при ретрансляции не будет превышать $2,5 \cdot 10^{-10}$. При увеличении мощности входного сигнала на 2 дБ, эта вероятность снижается до 10^{-12} . Ниже перечислены основные требования со стороны стандарта FDDI PMD к оптическим приемопередатчикам:

- Максимальная мощность передатчика -14 дБм;
- Минимальная мощность передатчика -20 дБм;
- Максимальная принимаемая мощность -14 дБм;
- Минимальная принимаемая мощность -31 дБм;
- Максимальные потери между станциями 11 дБ;
- Максимальные потери на км кабеля 2,5 дБ.

Главным требованием спецификации SMF-PMD по мощности является такое же значение, как и в MMF-PMD, минимальной допустимой мощности оптического сигнала на входе станции (-31 дБм). Это связано с идентичностью оптических приемников при MMF-PMD и SMF-PMD, рассчитанных на работу в окне 1300 нм.

Стандарт на витую пару TP-PMD предусматривает использование витой пары на медном кабеле, как альтернативы оптическому волокну. Причиной разработки этого стандарта было стремление создать менее дорогостоящее оборудование и упростить процедуру инсталляции сети. Стандарт TP-PMD основан на использовании как экранированной витой пары STP – тип 1 или 2 (две пары), так и неэкранированной витой пары UTP – категории 5 (4 пары).

Существует несколько категорий неэкранированной витой пары, предназначенных для передачи голоса и данных. Стандартизация такой продукции осуществляется двумя крупными организациями EIA/TIA, UL и NEMA. Категории 1 и 2 обычно используются для передачи голоса или низкоскоростной передачи данных, например, стандартный порт RS232. В локальных сетях используются следующие три категории неэкранированных витых пар (в настоящее время преимущественно выпускаются неэкранированные витые пары категории 5):

- Категория 3: охватывая полосу 10 Мбит/с (допустимая длина сегмента 100 м), используется в сетях Ethernet (10 Мбит/с);
- Категория 4: охватывая полосу 16 Мбит/с (допустимая длина сегмента 100 м), используется в сетях Token Ring 16 Мбит/с, Ethernet;

- Категория 5: охватывающая полосу 155 Мбит/с (допустимая длина сегмента 100 м), используется в сетях ATM (155 Мбит/с), FDDI, а также может использоваться в менее скоростных сетях Token Ring, Ethernet.

Функция регистрации сигнала уровня PMD

Во всех кабельных системах, принятых в FDDI, предусмотрена специальная функция, при помощи которой контролируется качество или целостность линий связи между соседними рабочими станциями. Она называется функцией регистрации сигнала (signal detect). При использовании оптического канала связи на основе этой функции осуществляется постоянный мониторинг значений мощности сигнала на входе PMD. Спецификация PMD требует от этого уровня выполнения функции Signal_Detect по определению факта наличия оптических сигналов на входе физического соединения станции. Этот сигнал передается на уровень PHY, где используется функцией определения статуса линии Line State Detect (рис. 6.10) [6].

При использовании оптической среды связи уровень PMD генерирует для PHY признак присутствия оптического сигнала Signal_Detect, если мощность входного оптического сигнала превышает $-43,5$ дБм, а снимает его при уменьшении этой мощности до -45 дБм и ниже. Таким образом, имеется гистерезис в $1,5$ дБм для предотвращения частых изменений статуса линии при колебании входной мощности сигнала около -45 дБм.

При использовании витой пары вместо проверки мощности входного сигнала обычно используется другой, более простой способ, который основывается на контроле целостности медных пар. Аппаратно замыкаются витые пары приемника и передатчика на удаленном конце, что дает возможность мерить величину постоянного тока при подаче на такую петлю постоянного напряжения. При наличии постоянного тока определенной величины, что свидетельствует о целостности медных витых пар, уровень PMD оповещает PHY командой регистрации сигнала Signal_Detect [1].

Таблица 6.6. Основные характеристики стандартов MMF-PMD, SMF-PMD и TP-PMD подуровня PMD

	PMD			
	MMF-PMD	SMF-PMD	TP-PMD	
Тип кабеля	оптическое волокно, многомодовое, градиентное, 62,5/125, 50/125	оптическое волокно, одномодовое, 8/125 – 12/125	экранированная витая пара STP IBM Type 1/2	неэкранированная витая пара UTP кат. 5
Тип соединителя	MIC mm Duplex SC mm 2 x ST mm	MIC sm Duplex SC sm 2 x ST sm	DB-9	RG-45
Расстояние между станциями, км *	до 2	до 20 (50)	до 0,1	до 0,1
Длина волны излучения, нм	1300	1300 (1550)	–	
Оптическая излучательная система	Светоизлучающий диод	Лазерный диод	–	
Допустимое затухание в кабельной системе, дБ	не больше, чем 11	не больше, чем 36, не меньше, чем 10**	–	
Оптический обходной переключатель	используется	используется	–	

* Допустимое расстояние между станциями – величина в некотором смысле условная. Главным фактором является вносимое затухание в кабельной системе. Оно может быть существенно уменьшено, если использовать оптическое волокно с лучшими оптическими характеристиками и стремиться делать меньшее число пассивных сухих соединительных стыков, в которых имеет место значительное затухание $0,5-0,7$ дБ/стык, а также производя высококачественную сварку волокон, что особенно важно в случае одномодового волокна. Для нормальной работы сети FDDI полное затухание в кабельной системе не должно превышать допустимого по бюджету. Отметим, что оборудование FDDI ряда фирм-производителей, в частности NBase-Fibronics, имеет более высокие характеристики, нежели установленные стандартом PMD.

** Ограничение снизу для одномодового волокна вызвано невозможностью различить битовый ноль в принимаемом сигнале от единицы. В том случае, если расстояние не достаточно велико, чтобы обеспечить требуемое затухание в 10 дБ, следует использовать специальные аттенюаторы, или аттенюаторные MIC-соединители.

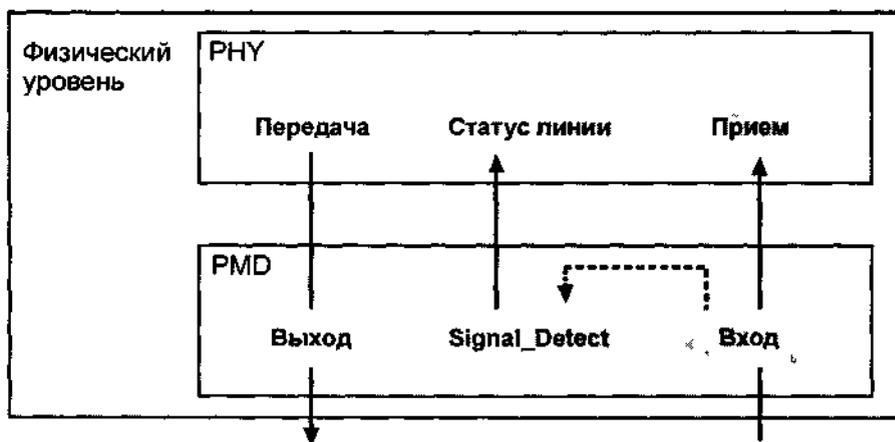


Рис. 6.10. Функция определения сигнала на входе PMD

Оптические соединители

Стандарты ANSI определяют пассивное оборудование FDDI для установления физической связи станций по оптико-волоконной кабельной системе. Таковым является соединитель MIC, который используется для соединения волоконно-оптического кабеля с FDDI станцией (рис. 6.11). Станция, в свою очередь, должна быть снабжена соответствующей стандартной розеткой.

Соединитель MIC имеет полярную структуру, что гарантирует правильное подключение оптических волокон на прием и передачу. Кроме этого, он снабжен ключом, который предотвращает от неправильного подключения к соответствующему порту. Возможные механические ключи MIC соединителей и розеток, определенные стандартом PMD, показаны на рис. 6.12.

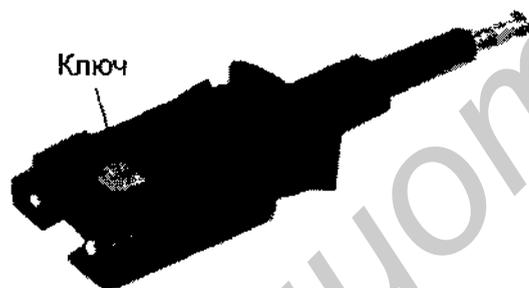


Рис. 6.11. Соединитель MIC



Рис. 6.12. Обозначения механических ключей соединителей MIC и соответствующих розеток разъемов портов

FDDI устройства также могут использовать оптические разъемы ST, FC (преимущественно под одномодовое волокно, стандарт SMF-PMD) и полярный разъем Duplex SC (как под многомодовое, так и под одномодовое волокно, PMD и SMF-PMD). Наибольшее распространение после стандарта MIC получил стандарт Duplex SC. Во первых, Duplex SC принят в качестве основного стандарта телекоммуникационными организациями многих стран. Во вторых, при меньшей стоимости он более компактен и имеет очень близкие технические характеристики. К незначительному минусу разъема Duplex SC можно отнести отсутствие ключей, хотя сложные физические топологии, приводящие к путанице, встречаются очень редко.

На практике сеть FDDI имеет смешанную кабельную систему, пример которой приведен на рис. 6.13. Для связи между зданиями (удаленными узлами) используется магистральный многомодовый или одномодовый кабель. Вертикальная кабельная система в пределах здания

строится на основе многомодового станционного кабеля. Горизонтальная разводка по этажам осуществляется при помощи оптических соединительных шнуров (оконцованного миникабеля) или витой пары. Заметим, что сама кабельная система является универсальной и может в равной степени подходить под использование другого сетевого оборудования, например Fast Ethernet или ATM, или смешанных решений.

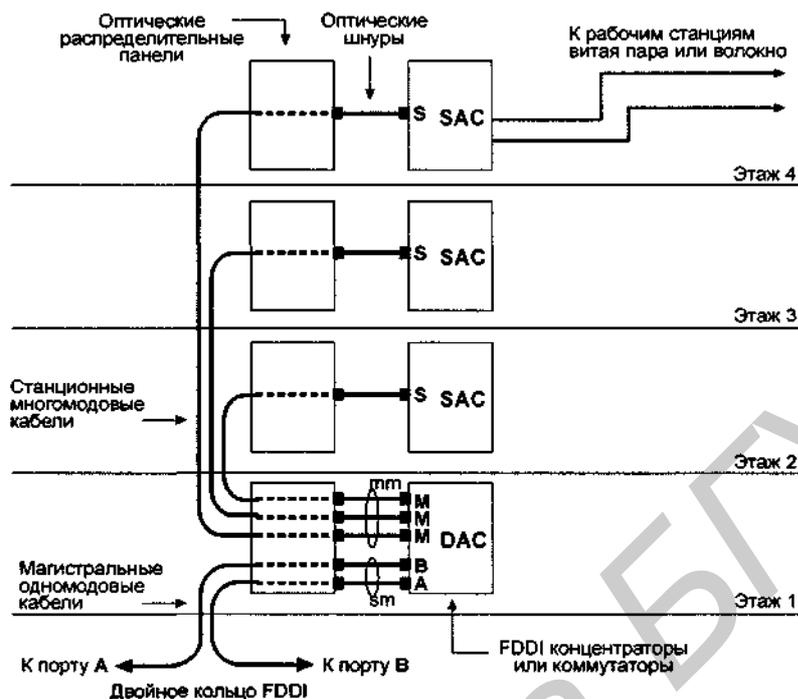


Рис. 6.13. Кабельная система участка сети FDDI

Сравнения оптического волокна и витой пары

Наличие кабельных систем трех стандартов (MMF-PMD, SMF-PMD и TP-PMD) предоставляет пользователю выбор в зависимости от конкретной ситуации. Приведем сравнительный анализ оптического волокна и витой пары.

Главные преимущества функционирования сети с использованием волоконно-оптического кабеля следующие: большие расстояния между станциями (пунктами ретрансляции); высокая помехозащищенность; отсутствие излучаемых помех; высокая степень защищенности от несанкционированного доступа; гальваническая развязка элементов сети; взрыво- и пожаробезопасность. Более подробно перечисленные свойства описаны в первой главе.

Причины, по которым заказчик может предпочесть медный кабель волоконно-оптическому, следующие: низкая стоимость восстановления обрывов; удобство использования в небольших рабочих группах.

Низкая стоимость подключения к рабочей станции. Витые пары STP IBM Type 1 и UTP cat. 5 могут существенно уменьшить затраты на сетевое оборудование, так как они не требуют установки дорогостоящих оптических приемопередатчиков и пассивных компонентов волоконной оптики.

Низкая стоимость восстановления обрывов. Для устранения обрыва витой пары не требуется дорогостоящее специальное монтажное оборудование, как в случае обрыва оптического кабеля. Можно также целиком заменить поврежденную витую пару, что оправдано ее низкой стоимостью.

Удобства использования в небольших рабочих группах. Витая пара будет удобной при использовании концентратора в рабочих группах, в конструкторских бюро. Это удобство является следствием меньшей стоимости FDDI-концентратора, имеющего порты для подключения витых пар.

6.6. Уровень PHY

Стандарт PHY (physical layer protocol – протокол физического уровня) верхнего подуровня физического уровня (рис. 6.3) определяет те функции физического уровня, которые не привязаны к типу среды передачи. Это позволяет модифицировать среду передачи, например использовать витую пару вместо оптического волокна, но при этом не изменять параметры уровня PHY.

Следующие компоненты, функции и характеристики определяются уровнем PHY:

- таймер и схема синхронизации – настройка временных параметров на основе временного анализа движения маркера и кадров данных по кольцу;
- процесс кодирования и декодирования – преобразование полученных от уровня MAC данных в формат, принятый для передачи между сетевыми устройствами FDDI;
- управляющие символы – минимальные сигнальные кванты, используемые для установления связи между станциями;
- эластичный буфер, используемый для компенсации допустимого отклонения часов соседних станций;
- функция сглаживания, позволяющая избежать потери кадров, имеющих короткие преамбулы;
- фильтр повторений, предотвращающий распространение ошибочных кодов и кодов сбойного состояния линии.

Синхронизация часов

Стандарт FDDI PHY определяет использование распределенных по станциям часов. Каждая станция имеет двое часов – часы для передачи и часы для приема данных [1, 11].

Часы для передачи данных не перестраивают частоту. На частоте этих часов станция передает или повторяет информацию в кольцо.

Часы для приема, напротив, имеют возможность подстраивать частоту. Получая данные, станция синхронизирует приемные часы по приходящей последовательности символов преамбулы, которая следует перед кадром. Далее станция декодирует данные кадра по этим часам. Частота приходящих битов определяется частотой передающих часов станции-отправителя этих битов. Следовательно, приемные часы синхронизируются по частоте передачи предыдущей станции. Однако, если нужно передавать эти данные обратно в кольцо, т.е. повторить, станция будет использовать свои собственные часы.

Кодирование и декодирование данных

Данные, прежде чем передаваться по сети, подвергаются кодированию с целью их более надежной передачи. Эту функцию выполняет уровень PHY, который кодирует полученные от уровня MAC данные и затем направляет их на уровень PMD. Уровень PHY также обрабатывает и обратный поток от PMD к MAC, рис. 6.14.

FDDI использует две последовательные системы кодирования: 4B/5B и NRZI – невозвращение к нулю с последующей инверсией на единицах [12].

Система кодирования данных 4B/5B. Если бы FDDI использовал ту же схему кодирования битов, что и применяемая в Token Ring или Ethernet, на каждый полезный бит информации приходилось бы два передаваемых сигнальных бита (манчестерское кодирование), рис. 6.15. Таким образом, потребовалось бы посылать 200 миллионов сигналов в секунду, чтобы передавать со скоростью 100 Мбит/с. Вместо этого в FDDI принята схема кодирования 4B/5B с меньшей избыточностью кода, которая преобразовывает каждые 4 бита данных в 5-битовые коды – символы, табл. 6.7. В результате, при скорости передачи данных 100 Мбит/с схема 4B/5B отправляет 125 миллионов сигналов в секунду (125 Мбод).

Заметим, что кодер 4B/5B обрабатывает группы битов (4 бита), соответственно декодер обрабатывает символы (5 битов). Следовательно, декодер должен выделять символы из непрерывного битового потока. Для этой цели, в частности, приемник синхронизируется с передатчиком на этапе приема.

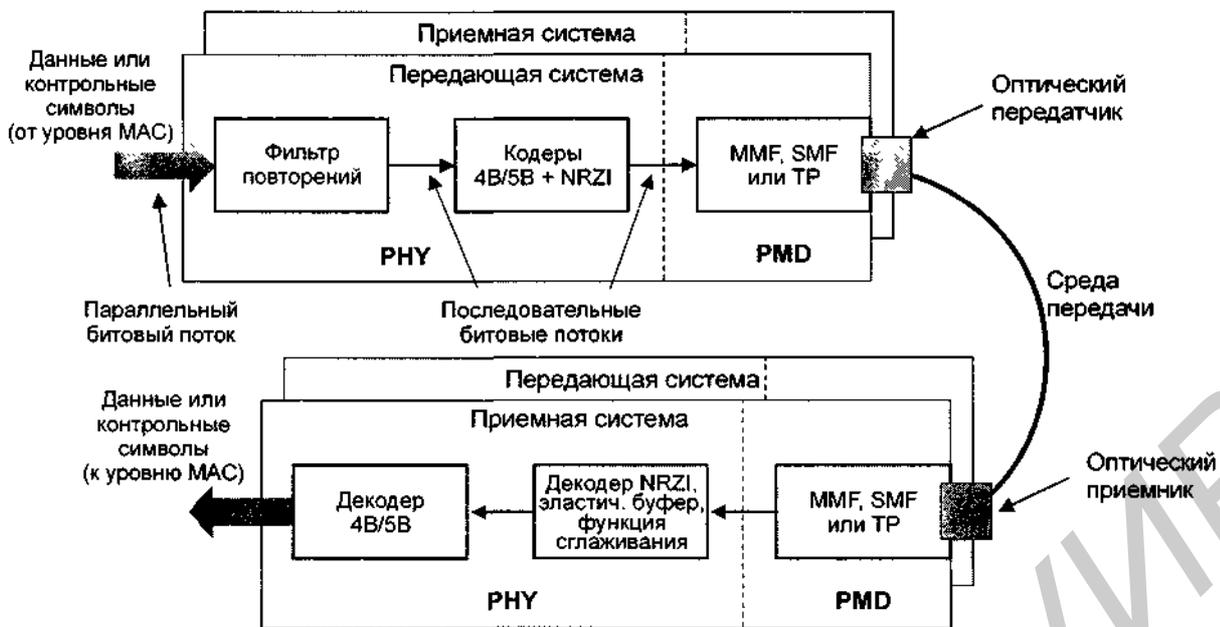


Рис. 6.14. Системы кодирования 4B/5B и NRZI уровня PHY

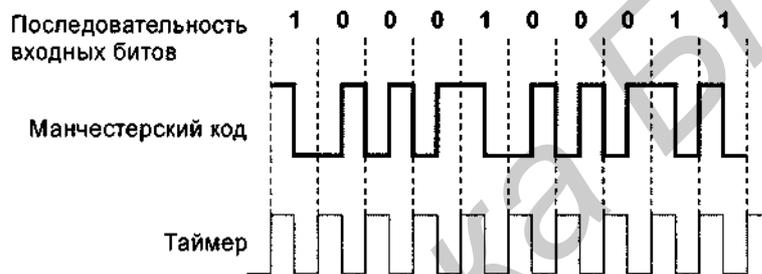


Рис. 6.15. Манчестерское кодирование, принятое в сетях Ethernet и Token Ring

Система кодирования NRZI. После выполнения кодирования данных 4B/5B происходит дальнейшее, теперь уже побитовое, кодирование NRZI. В этой схеме нулю входящей последовательности соответствует повторение уровня предыдущего элемента (сохранение состояния), а единице – энергетический переход в альтернативное состояние, рис. 6.16. Таким образом, чем больше единиц во входной последовательности, тем больше будет перепадов сигнала на выходе (выше эффективная частота в линии) и наоборот.

Преобразование NRZI, если его рассматривать отдельно, не очень эффективно. Например, если передаются только 0, то приемник на удаленном узле все это время не будет обнаруживать перепадов сигнала, что ухудшает синхронизацию приемника. Поскольку практически было бы невозможно предотвратить эту ситуацию (нельзя гарантировать, что в потоке данных от пользователя не будут появляться длинные последовательности нулей), дополнительное кодирование предшествует NRZI. Это кодирование должно гарантировать, что после него не будут встречаться большие последовательности нулей, независимо от того, какие данные передаются от пользователя. И именно эту функцию обеспечивает кодирование 4B/5B, которое, таким образом, помогает не только повысить помехоустойчивость передаваемой информации, но и решить проблему синхронизации. Природа кодирования 4B/5B такова, что в выходном битовом потоке никогда не встретится больше трех нулей.

Заметим, что первый бит выходной последовательности не определен. Эта неопределенность, однако, не опасна, поскольку приемник срабатывает по перепаду входного сигнала (отсутствие перепада означает 0, перепад – 1). Таким образом, в случае использования оптической среды связи, последовательность нулей на входе кодировщика NRZI, которых может быть максимум три, преобразуется либо в непрерывный световой сигнал, либо в полное его отсутствие. Процесс декодирования происходит в обратном порядке.

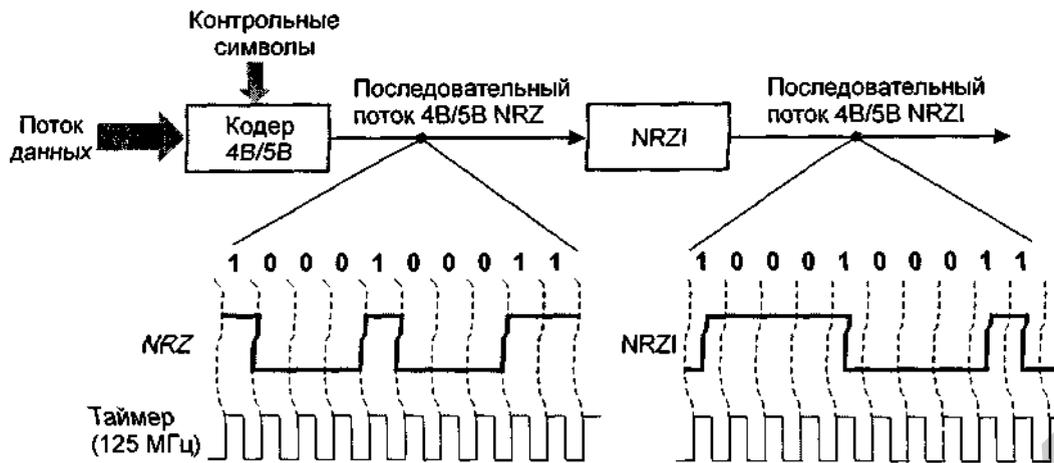


Рис. 6.16. Система кодирования 4B/5B, NRZ и NRZI

Символы кодирования. В табл. 6.7 представлен список 5-битовых символов, используемых в стандарте FDDI. Допустимо всего 32 возможных комбинации из 5 бит, из которых реально задействованы только 25 символов. По назначению они разбиваются на 4 группы [12]:

- Символы статуса линии (3) – **Q, I, H**. Эти символы сигнализируют о состоянии линии и распознаются оборудованием физического уровня (PHY). Группы этих символов используются на этапе установления связи между уровнями PHY соседних устройств. Символ **I** (Idle) передается в промежутках между передаваемыми кадрами с целью поддержки синхронизации приемных часов станций.
- Ограничители (4): начальные – **J, K, L**, конечный – **T**. Начальный ограничитель **L** не используется в базовом стандарте FDDI и предназначается для FDDI-II.
- Контрольные индикаторы (2) – **R, S**.
- Символы данных (16). Эти символы не являются служебными и используются для кодирования данных.

Оставшиеся семь символов из 32 (см. табл. 4.1) не передаются – передача их нарушила бы рабочую длину кода и требования по балансу постоянной составляющей. Символы обычно объединяются в пары, так что общее число символов в кадре всегда четно и не превышает 9000.

Баланс постоянной составляющей. В FDDI, в силу особенностей кодирования, может наблюдаться эффект смещения постоянной составляющей от среднего значения. Отклонение постоянной составляющей (baseline wander) возникает, когда усредненное по какому-то промежутку времени значение переменного сигнала ненулевое. При манчестерском кодировании каждый входной бит представляется парой сигналов +1 и -1, таким образом сохраняется нулевой баланс по постоянному току. В стандарте FDDI совокупность кодирований 4B/5B и NRZ/NRZI не гарантирует нулевой баланс в выходной последовательности, но дает достаточно близкое значение к 0. В наихудшем случае допускается отклонение $\pm 10\%$. Это важное свойство выходной последовательности должно учитываться при конструировании приемников.

Состояния линии. Во время процедуры установления соединения соседние станции обмениваются не отдельными символами, а достаточно длинными последовательностями символов, что повышает надежность взаимодействия. Эти последовательности называются состояниями линии (line states).

Состояния линии (обозначения и описания) приведены в табл. 6.8. Отметим, что кодирование NRZI символов состояний линии приводит к меандру – регулярным волнам с квадратными фронтами различной частоты. Максимальная частота имеет место при состоянии линии ILS – 62,5 МГц. Всего используется 4 состояния линии: QLS, MLS, HLS и ILS. Оставшиеся два – ALS и NLS – обозначают соответственно нормальный рабочий режим канала, сопровождающийся передачей данных, и плохую линию с большим уровнем помех.

Таблица 6.7. Кодирование символов в FDDI

Десятичный код	Двоичное кодирование	Символ	Имя	Назначение
00	00000	Q	QUIET	Символ статуса линии
31	11111	I	IDLE	"
04	00100	H	HALT	"
24	11000	J		Начальный ограничитель
17	10001	K		"
05	00101	L		"
13	01101	T		Конечный ограничитель
07	00111	R	RESET	Контрольный индикатор
25	11001	S	SET	"
30	11110	0		Символы данных 0000 (0)
09	01001	1		" 0001 (1)
20	10100	2		" 0010 (2)
21	10101	3		" 0011 (3)
10	01010	4		" 0100 (4)
11	01011	5		" 0101 (5)
14	01110	6		" 0110 (6)
15	01111	7		" 0111 (7)
18	10010	8		" 1000 (8)
19	10011	9		" 1001 (9)
22	10110	A		" 1010 (10-A)
23	10111	B		" 1011 (11-B)
26	11010	C		" 1100 (12-C)
27	11011	D		" 1101 (13-D)
28	11100	E		" 1110 (14-E)
29	11101	F		" 1111 (15-F)
01	00001	V	VIOLATION*	Не передаются
02	00010	V	VIOLATION	"
03	00011	V	VIOLATION	"
06	00110	V	VIOLATION	"
08	01000	V	VIOLATION	"
12	01001	V	VIOLATION	"
		V	VIOLATION	"

* Символы VIOLATION (нарушение) при правильной работе сети не передаются, следовательно, прием такого символа может означать либо низкое качество линии (большой уровень ошибок, помех), либо неисправность соседней передающей станции.

Особенности кодирования при передаче по витой паре

Схему кодирования 4B/5B+NRZI нельзя применять к медной кабельной системе на основе неэкранированной витой пары UTP кат.5 из-за жестких требований по электромагнитному излучению и длине сегментов. В то же время, эта схема допустима при использовании эк-

ранированной витой пары IBM тип 1 или 2 – SDDI. Поэтому спецификации уровня FDDI TP-PMD, главным образом, ориентированы на создание помехоустойчивого кода в линии на основе UTP кат.5. Рассмотрение работы уровня TP-PMD интересно вдвойне, поскольку эти спецификации также были использованы позже в стандарте Fast Ethernet (100Base-TX) – весьма популярном современном сетевом стандарте.

Таблица 6.8. Состояния линии

Обозначение состояния	Описание	NRZI
QLS (quiet line state)	Состояние молчания, заключается в передаче 16 или 17 символов Q (Quiet) подряд – сигнала нет	Нет изменений в сигнале (0 Гц)
MLS (master line state)	Состояние главного порта, заключается в передаче 8 или 9 пар символов H-Q (Halt и Quiet) – используется в процессе инициализации порта и для других функций	Один переход на 10 бит (6,25 МГц)
HLS (halt line state)	Состояние останова заключается в передаче 16 или 17 символов H (Halt) подряд – используется в процессе инициализации порта	Два перехода на 10 бит (12,5 МГц)
ILS (idle line state)	Состояние простоя, заключается в передаче 16 или 17 символов I (Idle) подряд – используется для поддержки синхронизации часов, в процессе инициализации и при нормальной работе сети для отделения кадров данных, указывает на наличие физического соединения, когда нет сетевой активности	Десять переходов на 10 бит (62,5 МГц)
ALS (active line state)	Состояние ALS – активно, при корректной передаче последовательностей кадров	Случайная величина, зависит от данных пользователя
NLS (noise line state)	Состояние плохой линии – указывает на наличие большого уровня помех в линии, обычно происходит при приеме символов Violation	Случайная величина, зависит от характера шума

Для передачи сигнала по UTP кат.5 с целью уменьшения высокочастотной составляющей электромагнитного излучения и достижения максимального расстояния передачи (100 м), наряду со схемой NRZ/NRZI, дополнительно используется схема MLT-3. Также особенностью передачи по неэкранированной витой паре является наличие скремблера на передающей стороне (дескремблера на приемной), и подстраиваемого эквалайзера, который устанавливается на приемной стороне и предшествует дескремблеру. Скремблер устанавливается после кодера MLT-3, и предназначен для уменьшения величины пиков сигналов в энергетическом спектре. Эквалайзер устанавливается на приемной стороне. Он, подстраиваясь под разную длину кабеля, принимает и преобразовывает сигнал к виду, приемлемому для дескремблера, рис. 6.17.

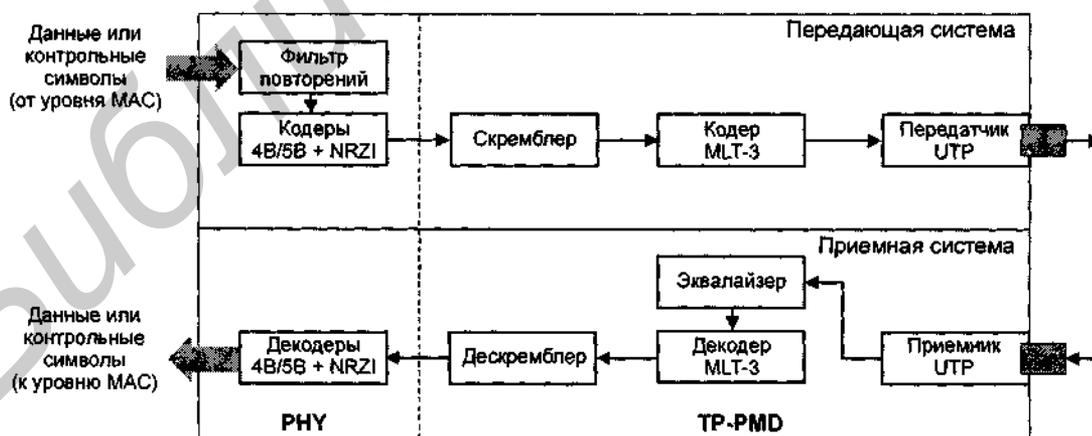


Рис. 6.17. Схема основных узлов уровня TP-PMD

Схема кодирования MLT-3. Эта схема описана в спецификациях TP-PMD FDDI и реализует трехуровневый выходной сигнала (+1, 0, -1). Схема аналогична NRZI в том, что перепады уровня в выходном сигнале происходят только тогда, когда на вход поступает 1. Причем, направление перехода из нулевого состояния в положительное или отрицательное определяется предысторией: если последний переход в нулевое состояние был из положительного состояния, то по приходу 1 переход будет в отрицательное состояние, и наоборот, если последний переход в нулевое состояние был из отрицательного, то по приходу 1 переход будет произведен в положительное состояние.

Максимальное число перепадов на выходе кодера имеет место тогда, когда на вход подается последовательность из единиц. Но и в этом случае период волнового фронта будет 4 бита, что эффективно ведет к уменьшению частоты сигнала в линии в 4 раза, то есть 31,25 МГц (вместо 125 МГц), что позволяет приблизиться к требованиям передачи данных по неэкранированной витой паре.

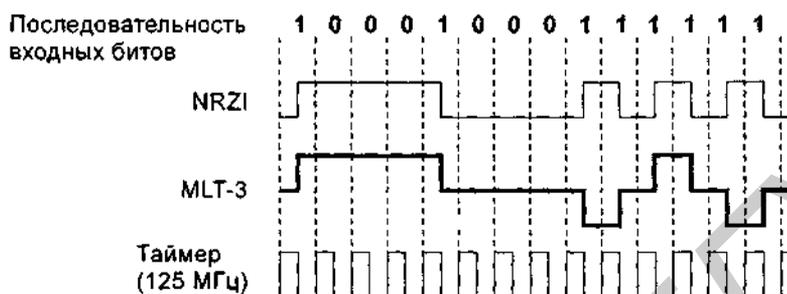


Рис. 6.18. Пример кодирования MLT-3

Скремблер. Применение кодера MLT-3 само по себе еще не достаточно хорошее решение, чтобы удовлетворить требования радиочастотного электромагнитного излучения. Неэкранированная витая пара излучает значительно сильнее экранированной витой пары, и, тем более, оптического волокна, особенно если передавать по ней сигнал с полосой 100 Мбит/с. Главное назначение скремблера – уменьшение значений энергетических пиков в спектре излучения витой пары.

Скремблер устанавливается между кодерами NRZI и MLT-3. Он модифицирует последовательность битов после кодера 4B/5B, подмешивая псевдослучайный компонент (используется полиномиальная функция $x^{11} + x^9$), рис. 6.19. Этот компонент затем удаляется на приемной стороне при помощи дескремблера. Для того, чтобы можно было восстановить битовый поток на приемной стороне необходимо, чтобы скремблер и дескремблер были синхронизированы между собой. В стандарте FDDI синхронизация происходит при помощи последовательностей символов состояний линии (ILS, MLS, QLS, HLS), что создает определенный рисунок сигнала на приеме. По этому рисунку "запускается" дескремблер. Скремблер и дескремблер имеют совершенно одинаковый принцип действия и используют одно и то же "затраченное" 11-битовое число. Таким образом, двойное применение скремблирования к биту потока восстанавливает прежнее значение.

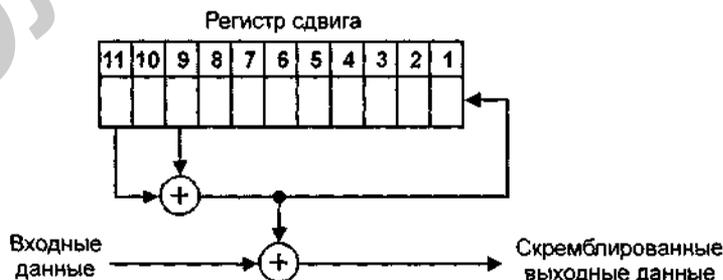


Рис. 6.19. Работа скремблера с функцией

Эластичный буфер

Из-за помех, влажности, перепадов температуры, скачков напряжения, временной нестабильности кварцевого генератора, частота часов не может быть постоянной величиной. Поэтому существует разброс по частотам часов разных станций. Полное кольцо, включая сетевые станции и кабельные коммуникации, должно сохранять битовую длину с тем, что бы ни один бит не мог быть создан или уничтожен в логическом кольце. Иначе не сохранится или исказится информация. Для этой цели используются специальные средства стабилизации. Уровень РНУ предусматривает два средства: эластичный буфер и функцию сглаживания (рис. 6.14).

Приемник имеет часы с подстраиваемой частотой, для чего использует такую стандартную технику, как фазовая подстройка колебаний генератора. Передатчик, напротив, использует часы с фиксированной частотой. *Эластичный буфер*, установленный на каждой станции, призван компенсировать разную скорость приема и передачи битов по сети, возникающую вследствие различия частот приемных и передающих часов. Установка буфера в среднее положение (заполняется только половина ячеек буфера – буфер работает на прием) наступает перед приходом кадра по преамбуле, которая предшествует кадру данных. Далее буфер начинает работать на прием и на передачу битов, поддерживая очередь FIFO (first in, first out – первым пришел, первым обслужен).

Часы передатчика стандартизованы со стабильностью $\pm 0,005\%$. Эластичный буфер работает с битами символов до процедуры декодирования 4В/5В. Поэтому для передачи кадра максимальной длины 9000 символов (4500 байт $\times 2$, так как каждый байт данных представлен двумя 5-битовыми символами в потоке по физической линии связи) или 45000 бит без переполнения буфера достаточно выбрать буфер длиной 10 бит ($45000 \times 0,00005 \times 2 \times 2 = 9$, плюс 1 бит для четной полной длины), где один множитель 2 учитывает максимальный разброс частот двух часов 0,01%, а другой множитель 2 учитывает возможность дрейфа уровня заполнения буфера как в сторону заполнения, так и в сторону освобождения.

Буфер длиной в 10 бит вносит задержку при ретрансляции маркера и кадров, которая при скорости передачи 125 Мбод эквивалента 0,08 мкс. Однако, принимая во внимание дополнительные задержки, в частности, при передаче битов между регистрами, это число – так называемое *латентное время станции* – увеличивается, и обычно оценивается в 1 мкс [13].

Латентное время сети – это время, которое требуется маркеру, испущенному станцией, возвратиться обратно к этой станции, при условии, что ни одна из станций не захватывает маркер. Это время складывается из латентных времен на станциях и задержках на сегментах из-за конечной скорости распространения света.

Если станция передает (ретранслирует) несколько кадров, следующих друг за другом, она может не успевать переводить буфер в среднее положение до обработки следующего кадра. В этом случае процедура установки буфера в среднее положение сопровождается процессом увеличения или уменьшения длины преамбулы (которая первоначально, в момент испускания кадра станцией-отправителем, составляет 16 или более символов). В частности, если настроенная частота приемных часов меньше частоты передающих часов, то возможно увеличение длины преамбулы у последовательно принимаемых кадров, так чтобы выравнивалось среднее время приема и передачи. Таким образом, по мере продвижения кадра (маркера) по сети длина предшествующей преамбулы может варьироваться от своего начального значения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения (начальное значение преамбулы маркера задается на этапе его инициализации, см. п.6.7. "Уровень MAC").

Функция сглаживания

Кадры с длинной преамбулой снижают производительность сети, не внося других проблем. Но уменьшение длины преамбулы до нуля означало бы потерю информации в критической ситуации. Проблему решает специально встроенный в РНУ элемент, выполняющий *функцию сглаживания*. Этот элемент проверяет длину преамбулы у всех проходящих кадров и, в зависимости от обстановки, вставляет или удаляет символы преамбулы с целью уменьшения разброса в длинах преамбул от их номинального значения в 16 символов. Расчеты, представленные техническим комитетом ANSI X3T9.5 на этапе разработки FDDI, показали, что выбранный алгоритм функции сглаживания в самом худшем случае обеспечивает вероятность потери кадра меньше, чем 10^{-12} , что в дальнейшем подтвердилось на практике при больших конфигурациях кольца.

Фильтр повторений

Фильтр повторений предотвращает распространение ошибочных кодов, в частности кодов нарушенного состояния линии VIOLATION, локализуя неисправный сегмент сети. В то же время, фильтр повторений позволяет распространяться неповрежденным или искаженным кадрам.

Пример 6.1. Положив, что скорость распространения света в волокне соответствует величине 5 мкс/км, оценим латентное время кольца FDDI в следующих случаях: а) 2 км и 20 станций, б) 20 км и 200 станций, в) 100 км и 500 станций.

Латентное время сети (кольца FDDI) определяется как $T_L = T_p + N \times T_s$, где T_p – полная задержка из-за конечной скорости распространения света, N – число станций, T_s – латентное время станции:

а) $T_L = 2 \times 5 + 20 \times 1 = 30$ мкс (или 3000 бит);

б) $T_L = 20 \times 5 + 200 \times 1 = 300$ мкс (30000 бит);

в) $T_L = 100 \times 5 + 500 \times 1 = 1000$ мкс (100000 бит).

Заметим, что латентное время вычислялось в предположении, что активно только первичное кольцо – при наличии вторичного кольца латентное время могло бы удвоиться. К возрастанию латентного времени ведет подключение вторичных устройств к кольцу, например концентраторов SAC, или рабочих станций SAS, поскольку увеличивается путь движения маркера – длина логического кольца и число устройств сети. Предельное латентное время равно 2000 мкс, в случае свертывания кольца.

6.7. Уровень MAC

Второй уровень базовой OSI модели – Канальный уровень. Он подразделяется на подуровень управления доступом к среде MAC и на подуровень управления логическим каналом LLC. Подуровень MAC составляет неотъемлемую часть стандарта FDDI. Стандартом MAC для FDDI определяются следующие службы:

- связи между станциями посредством передачи маркеров и кадров;
- равноправного управления доступом к среде через использование временного протокола обращения маркера TTRP (timed token rotation protocol);
- создания маркеров и кадров;
- передачи, получения, повторения, удаления кадров и маркеров из кольца;
- механизмов обнаружения ошибок;
- инициализации кольца;
- изоляции неисправных станций и участков кольца и др.

Маркеры и кадры

Между станциями, объединенными в сеть FDDI, устанавливается логическое кольцо связи, по которому циркулируют маркер и кадры. Главный принцип кольца состоит в том, чтобы станции повторяли кадры, идущие от вышестоящих соседей к нижестоящим. Главная функция станции – определить, какая станция в данный момент имеет контроль доступа к среде. MAC занимается планированием по предоставлению возможности станциям передавать данные.

На рис. 6.20 а показан формат кадра FDDI. Назначения полей следующие [12]:

- Преамбула PA. Любой кадр должен предваряться преамбулой, состоящей, как минимум, из 16 символов idle (I). Эта последовательность предназначена для вхождения в синхронизм генератора RCRCLK, обеспечивающего прием последующих символов кадра.
- Начальный ограничитель SD. Состоит из пары символов JK, которые позволяют однозначно определить границы для остальных символов кадра.
- Поле управления FC. Идентифицирует тип кадра и детали работы с ним. Имеет 8-битовый формат и передается с помощью двух символов. Состоит из подполей, обозначаемых как CLFFZZZZ, которые имеют следующее назначение:

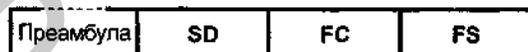
- C – тип трафика кадра – синхронный (значение 1) или асинхронный (значение 0);
 - L – длина адреса кадра (2 или 6 байт);
 - FF – тип кадра, может иметь значение 01 для обозначения кадра LLC (пользовательские данные) или 00 для обозначения служебного кадра MAC-уровня. Служебными кадрами MAC-уровня являются кадры трех типов – кадры процедуры инициализации кольца Claim Frame, кадры процедуры сигнализации о логической неисправности Beacon Frame и кадры процедуры управления кольцом SMT Frame;
 - ZZZZ – детализирует тип кадра.
- Адрес назначения DA – идентифицирует станцию (уникальный адрес) или группу станций (групповой адрес), которой(ым) предназначен кадр. Может состоять из 2-х или 6-ти байт.
 - Адрес источника SA – идентифицирует станцию, сгенерировавшую данный кадр. Поле должно быть той же длины, что и поле адреса назначения.
 - Информация INFO – относится к операции, указанной в поле управления. Поле может иметь длину от 0 до 4478 байт (от 0 до 8956 символов). Стандарт FDDI допускает размещение в этом поле маршрутной информации алгоритма Source Routing, определенной в стандарте 802.5. При этом в два старших поля адреса источника SA помещается комбинация 102 – групповой адрес, комбинация, не имеющая смысла для адреса источника, а обозначающая присутствие маршрутной информации в поле данных.
 - Контрольная последовательность FCS – 32-битная последовательность, вычисленная по стандартному методу CRC-32, принятому и для других протоколов IEEE 802. Контрольная последовательность охватывает поля FC, DA, SA, INFO и FCS.
 - Конечный ограничитель ED – символ Terminate (T), обозначающий границу кадра. Однако за ним располагаются еще признаки статуса кадра.
 - Статус кадра FS. Первые три признака в поле статуса должны быть индикаторами ошибки (error, E), распознавания адреса (address recognized, A) и копирования кадра (frame copied, C). Каждый из этих индикаторов кодируется одним символом, причем нулевое состояние индикатора обозначается символом reset (R), а единичное – set (S). Стандарт позволяет производителям оборудования добавлять свои индикаторы после трех обязательных.

Маркер состоит, по существу, из одного значащего поля – поля управления FC, которое содержит в этом случае 1 в поле C и 0000 в поле ZZZZ, рис. 6.20 б.



- SD - начальный ограничитель (starting delimiter)
- FC - поле управления (frame control)
- DA - адрес назначения (destination address)
- SA - адрес источника (source address)
- INFO - информация
- FCS - контрольная последовательность (frame check sequence)
- ED - конечный ограничитель (ending delimiter)
- FS - статус кадра (frame status)

(а) Общий формат кадра



(б) Формат маркера

Рис. 6.20. Форматы кадра и маркера FDDI

Временной анализ процессов передачи маркера и кадров

В начале главы приводились основные отличия протокола управления маркером FDDI от принятого в Token Ring. Рассмотрим несколько подробнее эти отличия, а также и особенности передачи маркера и кадров в FDDI.

Поскольку FDDI задумывался как стандарт, допускающий построение протяженных магистралей, то необходимо было предусмотреть эффективность работы при больших латентных временах сети (в примере 6.1 показывалось, как возрастает латентное время сети с ростом ее протяженности). Стандарт Token Ring разрабатывался под использование сетей с кольцевой топологией небольшой протяженности, то есть сетей с малыми латентными временами. В этом случае особой роли не играл тот факт, что в Token Ring станция, передающая данные и удерживающая маркер, дожидалась, пока последний испущенный ею кадр не возвратится обратно к ней, проверяла поле статуса кадра FS и только после этого выпускала маркер дальше по кольцу. Такой алгоритм становится особенно неэффективным, когда в кольцевой сети с большим латентным временем одновременно желают передавать много станций. Это главный недостаток стандарта Token Ring.

В стандарте FDDI с учетом допустимости больших латентных времен сети предусмотрен механизм раннего испускания маркера. Станция, удерживающая маркер, выпускает его сразу же вслед последнему отправленному кадру (вслед за полем FS кадра), не дожидаясь, пока тот совершит "круг почета" по кольцу. А это означает, что другая станция, получив маркер, может раньше начать передачу, что увеличивает производительность сети FDDI. Из-за механизма раннего испускания маркера в кольце могут одновременно двигаться более одного кадра, испущенные от одной или от разных станций (адресами источника).

Фрагменты кадров. Следует обратить внимание еще на одну интересную особенность FDDI. Основная функция удаления кадра из кольца возлагается на станцию-источник. Пусть станция уже отправила все кадры, предназначенные для передачи. Далее она должна идентифицировать свои кадры, которые возвращаются к ней после оборота по кольцу, и ликвидировать их. Пусть к этому моменту станция уже освободила маркер. Далее станция читает поле SA – адрес отправителя. Если этот адрес не совпадает с собственным адресом станции, она ретранслирует кадр. Помещение в буфер предыдущих полей (SD, FC, DA) до момента выяснения, чей кадр – привело бы к дополнительной задержке при ретрансляции чужого кадра. Поэтому, чтобы уменьшить латентное время пребывания кадра на станции, станция начинает ретранслировать начало кадра, не дожидаясь проверки поля SA. Если адрес SA совпадает с собственным адресом, то станция прекращает передачу. Тем самым в кольце появляется фрагмент кадра – урезанный ненужный кадр. Фрагменты могут удаляться любой станцией, которая удерживает маркер, поскольку такой станции предоставляются большие возможности по буферизации входных данных, пока она сама передает свои кадры. Появление фрагментов кадров характерно для протяженных сетей и сетей, в которых станции передают короткие кадры, когда кадр не успевает возвратиться обратно к станции-источнику после того, как эта станция выпускает маркер, пример 6.2.

Пример 6.2. Оценить длину (км), которую занимает, распространяясь в волокне (а) маркер, (б) кадр FDDI длиной 100 байт, (в) кадр FDDI максимальной длины (4500 байта). Скорость распространения света в волокне положить соответствующей величине 5 мкс/км.

При скорости передачи 100 Мбит/с на передачу одного бита требуется время 0,01 мкс, на передачу одного байта время 0,08 мкс, и на передачу n байт время $0,08n$ мкс. Длина пути света, соответствующая этому времени, будет $0,08n/5$ км = $0,016n$ км.

(а) маркер с учетом преамбулы имеет длину 81 бит или 10,125 байт. Отсюда $L = 0,162$ км;

(б) $L = 0,016 \times 100 = 1,6$ км;

(в) $L = 0,016 \times 4500 = 72$ км.

Временной протокол обращения маркера TTRP (timed token rotation protocol). В FDDI каждая станция вычисляет время обращения маркера TRT (token rotation time), точнее, временной интервал между двумя последовательными приемами маркера, что включает в себя времена, требуемые на передачу всех кадров от всех станций, включая исходную станцию. Ясно, что при слабой загруженности кольца TRT мало, и наоборот. То есть TRT может служить мерой загруженности кольца. Также все станции имеют предустановленное одно и то же значение другого не изменяющегося во время работы сети временного параметра – *требуемого времени обращения маркера TTRT (target token rotation time)*, которое должно находиться в пределах от 4 мс до 165 мс. Об этом едином для всех значениях TTRT станции договариваются еще на этапе инициализации кольца. При этом в рабочем состоянии действует следующее основное правило: станция может удерживать маркер и передавать данные в течении време-

ни удержания маркера THT (token holding time), которое определяется как $THT = TTRT - TRT$. Если THT положительно, то по приходу маркера станция может передавать данные. Если же THT отрицательно, станция, даже если она хочет передавать, должна высвободить полученный маркер и ожидать более приемлемых условий при следующем приходе маркера. Несмотря на это кажущееся неудобство, протокол TTRP очень эффективен и предоставляет равные права на передачу данных при условии, что администратором установлены одинаковые значения TTRT на станциях.

На рис. 6.21 показан пример работы протокола, когда в кольце с полным латентным временем T_L расположено три равноудаленных друг от друга станции с одинаковым установленным значением TTRT. В дальнейших выкладках будем пренебрегать временем, требуемым на передачу маркера.

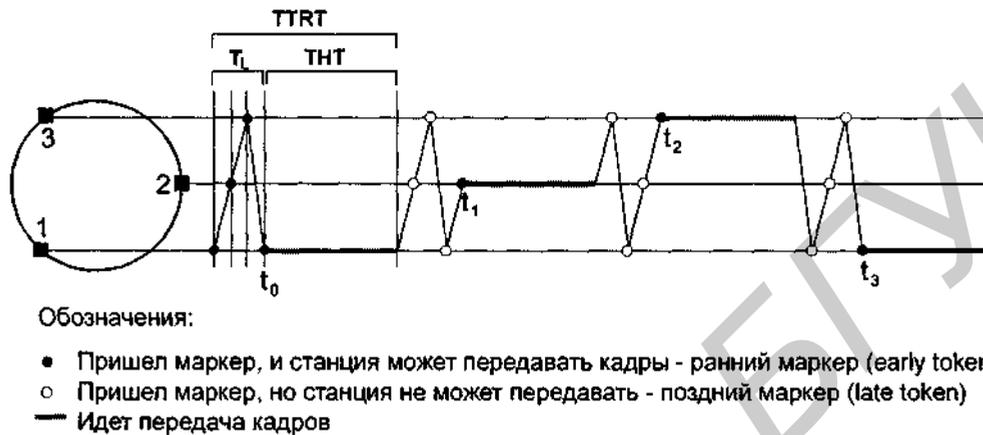


Рис. 6.21. Временной анализ процесса передачи маркера и данных для трех станций

Пусть сначала ни одна из станций не передавала данные, и маркер свободно циркулировал от станции к станции. Но в момент времени t_0 все три станции желают начать продолжительную передачу. Поскольку в этот момент маркер приходит на станцию 1, она становится претендентом номер 1 на передачу данных. Станция 1 вычисляет время обращения маркера TRT между двумя последующими приходами, которое равно T_L . Затем она вычисляет допустимое время передачи THT, которое равно $TTRT - T_L$, выполняет передачу в течение этого времени и испускает маркер. Маркер приходит на станцию 2, которая также вычисляет время, допустимое на передачу. Оно оказывается равным 0, так как вычисленное время TRT равно TTRT. По той же причине станции 3 и 1 также не могут передавать. Только в момент $t_1 = t_0 + TTRT + T_L/3$ станция 2 получит возможность передавать. Станция 3 получит возможность передавать в момент: $t_2 = t_0 + 2TTRT + 2T_L/3$, а станция 1 вновь получит возможность передавать в момент $t_3 = t_0 + 3TTRT + 3T_L/3 = t_0 + 3TTRT + T_L$, и т.д., причем каждая станция может передавать в течение времени $TTRT - T_L$.

Производительность такой сети U можно рассчитать как отношение времени, в течение которого велась передача в промежутке от t_0 до t_3 , к этому промежутку времени:

$$U = \frac{3(TTRT - T_L)}{3TTRT + T_L} \quad [11].$$

В общем случае для n станций производительность определяется по формуле [12]:

$$U = \frac{n(TTRT - T_L)}{nTTRT + T_L} \approx \frac{TTRT - T_L}{TTRT}.$$

В правой части выражения мы пренебрегли малой величиной T_L по сравнению с $nTTRT$ в знаменателе. Из формулы видно, что при фиксированном значении латентного времени производительность будет возрастать с ростом $TTRT$. Увеличение $TTRT$ ведет к уменьшению процессов переключений кольца в единицу времени, когда маркер переходит от станции к станции.

Предыдущее упрощенное рассмотрение предполагало наличие одного вида трафика. Однако для стандарта FDDI предусмотрена передача кадров двух типов трафика – синхронного и асинхронного [13].

Синхронный трафик предназначен для приложений, которые требуют предоставления им гарантированной пропускной способности (для передачи голоса, видеоизображения, управления процессами и других случаев работы в реальном времени). Для такого трафика каждой станции предоставляется фиксированная небольшая часть пропускной способности кольца FDDI, поэтому станция имеет право передавать кадры синхронного трафика в течение определенного времени T_{synch} всегда, когда она получает маркер от предыдущей станции.

Асинхронный трафик – это обычный трафик локальных сетей, не предъявляющий высоких требований к задержкам обслуживания. Станция может передавать асинхронные кадры только в том случае, если при последнем обороте маркера по кольцу для этого осталась какая-либо часть неизрасходованной пропускной способности. С учетом возможности передачи двух видов трафика, временем удержания маркера THT правильней называть интервал времени, в течение которого станция может передавать асинхронные кадры. Это время с учетом поправки на синхронный трафик определяется по формуле $THT = TTRT - TRT - T_{synch}$.

Изохронный трафик и стандарт FDDI-II. Синхронный трафик не удовлетворяет более жестким требованиям синхронной передачи, таким как: величина вариаций задержки или дрожание. Для этой цели было разработано расширение стандарта FDDI, которое получило название FDDI-II. Фактически станция, поддерживающая этот стандарт, может работать в двух режимах: в традиционном режиме (основная мода) и в режиме FDDI-II (гибридная мода). В последнем случае взаимодействие станций больше напоминает асинхронную TDM магистраль (см. гл. 5). По сути дела, FDDI-II оказался совершенно другим стандартом, плохо совместимым со стандартом FDDI. По этой причине он не получил большого распространения и здесь не рассматривается.

Мониторинг и инициализация кольца

Все вместе станции сети ведут непрерывный распределенный мониторинг работы кольца. В случае обнаружения ошибок или попытки их коррекции, при включении новой станции в кольцо и при выходе станции из кольца, при обнаружении какой-либо станцией факта утери маркера (маркер считается утерянным, если станция не получает его в течение удвоенного времени $TTRT$), при обнаружении длительного отсутствия активности в кольце, когда станция в течение определенного времени не наблюдает проходящих через нее кадров данных, по команде от блока управления станцией SMT будут иметь место три следующих процесса:

- процесс заявлений по запуску маркера (claim token process);
- процесс запуска маркера и инициализации кольца (initialization process);
- процесс сигнализации, на основании которого происходит изоляция неисправного участка кабеля или исключение неисправной станции из кольца (beacon process).

Процесс заявлений по запуску маркера. Во время этого процесса вырабатывается единое для всех станций время $TTRT$, и определяется станция, которая будет запускать маркер. Обычно это право получает станция с меньшим значением выставляемого вначале времени $TTRT$. В течение этого процесса каждая станция непрерывно передает находящейся ниже по течению станции специальные заявительные кадры, содержащие адрес источника кадра и заявленное значение $TTRT$, и одновременно прослушивает полученные от вышестоящей станции аналогичные кадры. При этом она либо ретранслирует полученные кадры, обновляя собственное значение параметра $TTRT$, либо продолжает передавать свои. Преимущество имеют кадры с меньшим значением $TTRT$. При равном значении $TTRT$ преимущество имеют кадры с большим значением MAC-адреса. Процесс заявлений прекращается, когда станция получает свой собственный заявленный кадр (заметим, что к этому моменту время $TTRT$ устанавливается на всех станциях одно и тоже). Эта станция начинает процесс инициализации кольца.

Процесс запуска маркера и инициализация кольца. Станция, которая выиграла процесс заявлений, запускает маркер в кольцо. Все остальные станции, получая маркер, прекращают процесс заявлений и ретранслируют маркер. На первом обороте маркера ни одна из станций, получая маркер, не может передавать кадры данных, а только переходит из состояния инициализации в рабочее состояние и переустанавливает свой счетчик времени TRT. Со второго оборота маркера кольцо работоспособно.

Процесс сигнализации. В случае повреждений кольца, например разрыва кольца, процесс заявлений не может завершиться, поскольку нет логического кольца. После истечения таймаута (в качестве предельного значения выбирается максимально допустимое время оборота маркера 165 мс), станции прекращают процесс заявлений и начинают передавать специальные сигнальные кадры. Сигнальные кадры передаются как в первичное, так и во вторичное кольца. Станция, получающая такой сигнальный кадр, пытается его ретранслировать. Процесс сигнализации прекращается, когда одна из станций получает свой собственный сигнальный кадр, что означает установление логического кольца. Эта станция начинает процесс заявлений по запуску маркера.

Общая схема процесса инициализации кольца показана на рис. 6.22.

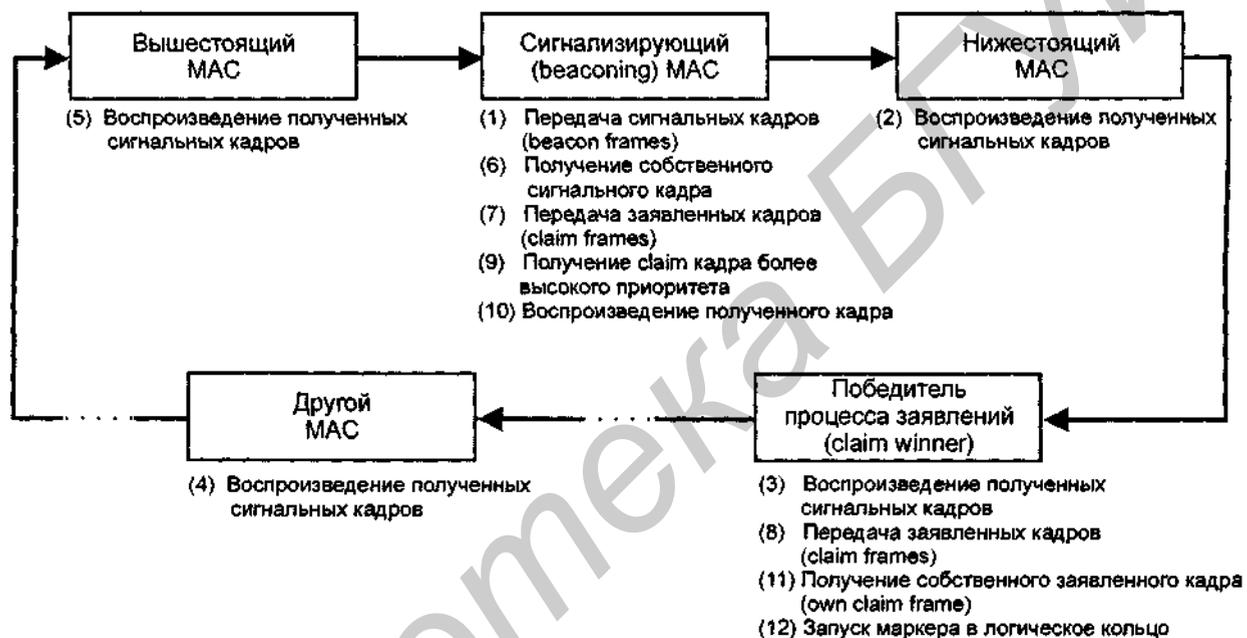


Рис. 6.22. Этапы инициализации логического кольца FDDI [12]

6.8. Обзор уровня SMT

Кроме спецификаций уровней PHY, PMD и MAC, стандарт FDDI определяет также спецификацию уровня управления станцией SMT (station management).

Эта спецификация определяет функции, которые должен выполнять каждый узел в сети FDDI. SMT контролирует и управляет всеми процессами канального и физического уровней, протекающими в отдельной станции. Кроме того, процесс SMT каждой станции взаимодействует с аналогичными процессами других станций для того, чтобы следить и координировать все операции в кольце FDDI. В этом случае SMT принимает участие в распределенном одно-ранговом управлении кольцом [6].

Спецификация SMT определяет три главных составляющие (рис. 6.23):

- управление соединениями CMT (connection management);
- управление кольцом RMT (ring management);
- управление, основанное на передаче кадров FBM (frame-based management).

Управление соединениями SMT

Компонент SMT ответственен за конфигурирование портов станций и подразделяется на:

- Управление координацией объектов ECM (entity coordination management) – следит за активностью компонентов внутри SMT, а также осуществляет прямой контроль за оптическим обходным переключателем, если тот присутствует. На станции имеет место только один процесс ECM;
- Управление физическим соединением PCM (physical connection management) – контролирует активность соответствующих портов и каналов связи с удаленными портами соседних станций. Один процесс PCM имеет место в расчете на один порт;
- Управление конфигурацией CFM (configuration management) – контролирует состояние конфигурационных контрольных элементов CCE (configuration control element). На каждый MAC и каждый физический порт приходится по одному элементу CCE.

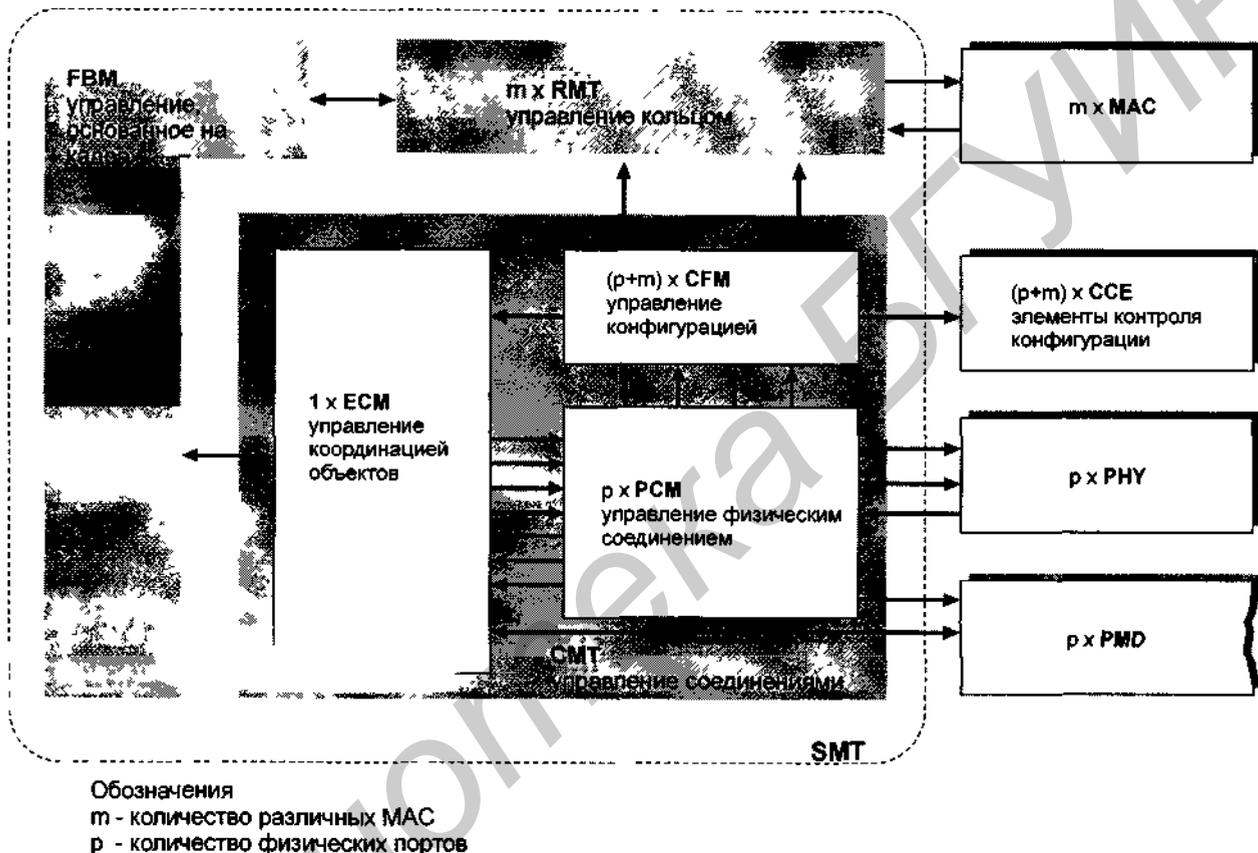


Рис. 6.23. Составляющие уровня SMT

Управление кольцом RMT

Для выполнения своих функций узел RMT взаимодействует с локальным узлом MAC, с узлом управления соединениями SMT, а также с другими узлами SMT станции. Узел RMT выполняет следующие функции.

Уведомление о статусе и наличии локального MAC-узла. RMT несет ответственность за уведомление других узлов SMT о:

- доступности MAC-узла для передачи и приема кадров и маркера;
- начале или завершении процесса Beacon в локальном узле;
- обнаружении факта дублирования MAC-адреса;

- старте функции Trase, позволяющей узлу выйти из состояния постоянной генерации кадров сигнализации о неисправности (состояние Stuck Beacon);
- неработоспособности кольца в течение длительного времени.

Процесс сигнализации и выход из него. Процесс сигнализации используется для изоляции серьезных повреждений кольца. Узел MAC начинает процесс Beacon в следующих ситуациях:

- процесс инициализации кольца Claim Token не завершился за отведенное ему время;
- узел SMT передал узлу MAC команду на инициацию процесса Beacon.

Управление, основанное на передаче кадров FBM

Этот компонент SMT является наиболее высокоуровневым, так как для его работы требуется, чтобы кольцо находилось в работоспособном состоянии и могло передавать между станциями кадры. Спецификация FBM определяет большое количество типов кадров, которыми обмениваются станции:

- Кадры информации о соседстве NIF позволяют станции выяснить адреса ее предшествующего и последующего соседей, выяснить наличие дублированных адресов, а также проверить работоспособность своего MAC-узла при отсутствии другого трафика. Информация об адресах соседей может быть собрана управляющей станцией для построения логической карты кольца.
- Кадры информации о статусе SIF используются станцией для передачи запроса о конфигурации и операционных параметрах другой станции. С помощью кадров SIF запрашиваются и передаются, например, данные о состоянии станции, значении счетчика кадров, приоритетах кадров, идентификаторе производителя.
- Кадры отчета о статусе SRF позволяют станции периодически посылать по кольцу информацию о своем состоянии, которая может быть интересна станции управления кольцом. Это может быть, например, информация об изменении состояния станции, о нежелательных соединениях, о слишком высокой интенсивности ошибочных кадров.
- Кадры управления параметрами PMF используются станцией для чтения или записи значений параметров базы данных управляющей информации SMT MIB.
- Эхо-кадры ECF позволяют станции проверить связь с любой станцией кольца.

6.9. Построение сетей FDDI

Когда рекомендуется использовать технологию FDDI

Преимуществом технологии FDDI является сочетание нескольких очень важных для локальных сетей свойств:

- высокая степень отказоустойчивости;
- способность покрывать значительные территории, вплоть до территорий крупных городов;
- высокая скорость обмена данными;
- детерминированный доступ, позволяющий передавать чувствительные к задержкам приложения;
- гибкий механизм распределения пропускной способности кольца между станциями;
- возможность работы при коэффициенте загрузки кольца, близком к единице;
- возможность легкой трансляции трафика FDDI в трафики таких популярных протоколов, как Ethernet и Token Ring за счет совместимости форматов адресов станций и использования общего подуровня LLC.

Пока FDDI – это единственная технология, которой удалось объединить все перечисленные свойства. В других технологиях эти свойства также встречаются, но не в совокупности. Так, технология Fast Ethernet также обладает скоростью передачи данных 100 Мбит/с, но она не позволяет восстанавливать работу сети после однократного обрыва кабеля и не дает возможности работать при большом коэффициенте загрузки сети (если не принимать во внимание коммутацию Fast Ethernet).

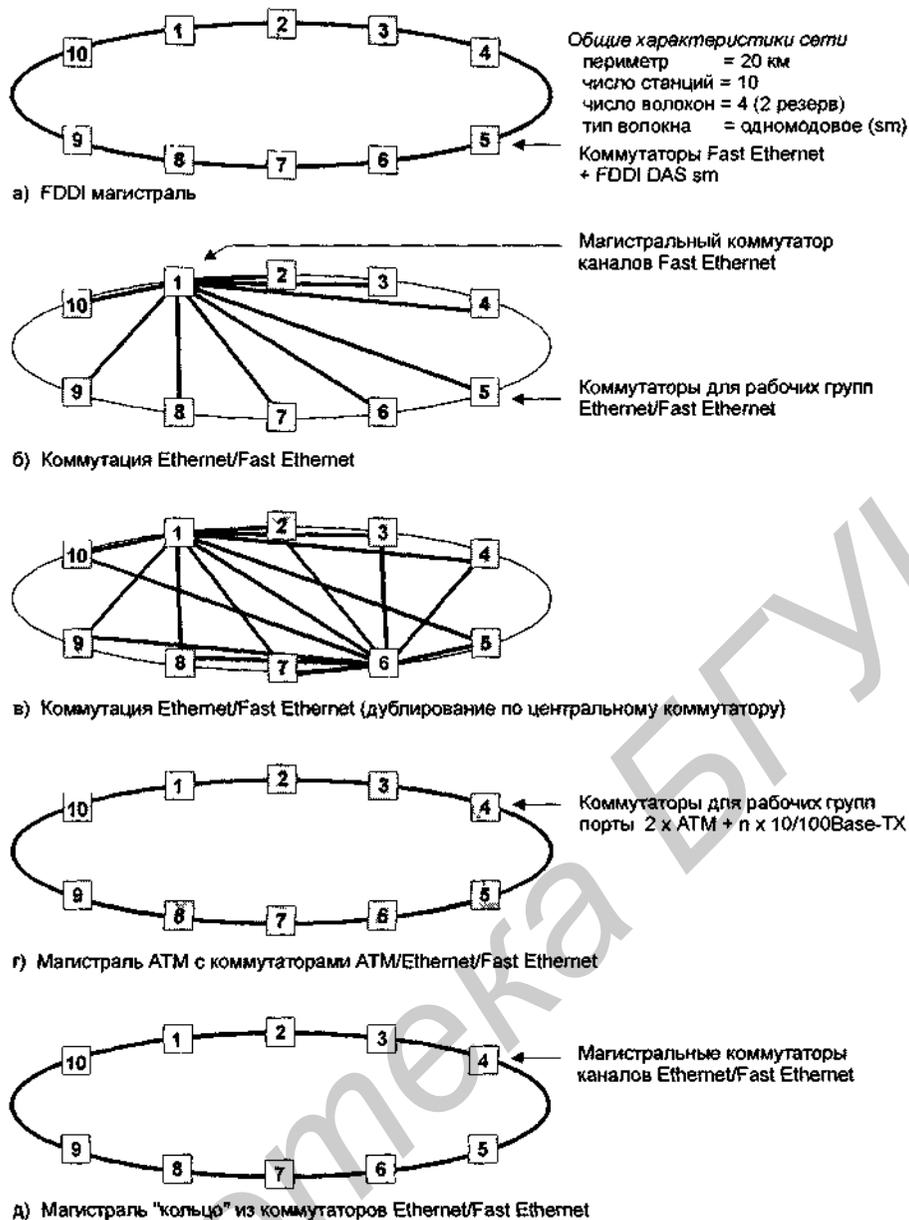


Рис. 6.24. Варианты построения магистральной корпоративной сети

Многие современные корпоративные сети построены с использованием технологии FDDI на магистрали в сочетании с технологиями Ethernet и Fast Ethernet в сетях этажей и отделов. Группа центральных серверов также обычно подключается к магистральному кольцу FDDI напрямую с помощью сетевых адаптеров FDDI.

Поставляемое оборудование

Выбор оборудования. На сегодня выпускается большое количество устройств FDDI, начиная от сетевых адаптеров FDDI и кончая FDDI/Ethernet/ATM коммутаторами. Поскольку прошло много времени с момента появления стандарта (в 1991 г. – основные спецификации стандарта FDDI, в 1994 г. – опубликованы спецификации ANSI TP-PMD и SMF-PMD), наблюдается очень высокая совместимость оборудования различных производителей. К крупным поставщикам оборудования FDDI относятся компании: 3Com, Adaptec, BayNetworks, Cabletron, Cisco, DEC, NBase-Fibronics, Madge, Network Peripherals, SysKonnnect и др.

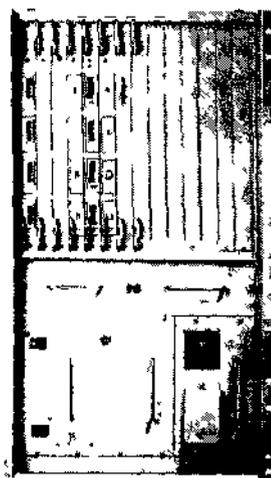
В табл. 6.9 приведены некоторые продукты FDDI, разбитые по основным категориям. На рис. 6.25 приведены некоторые FDDI устройства.

Таблица 6.9. Категории устройств FDDI

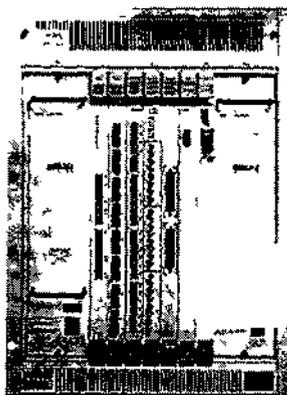
Название продукта	Описание	Производитель
Сетевые карты (подробный каталог приведен в [14])		
FDDILink 32-Bit PCI Fiber SAS/ Fiber DAS/ UTP SAS	3 сетевые карты PCI: SAS разъем Duplex SC mm / DAS два разъема Duplex SC mm, гнездо питания OBS / SAS разъем RJ-45 (CDDI)	3Com [15]
FDDILink-F 32-Bit EISA / FDDILink-UTP 32-Bit EISA	2 сетевые карты EISA: SAS разъем MIC mm / SAS разъем RJ-45	
PC8735/LCF, PC8739, PC8736/LCF, PC8739/D	4 сетевые карты EISA: SAS разъем Duplex SC mm/ SAS разъем RJ-45 (MLT-3, CDDI) / DAS два разъема Duplex SC mm, питание OBS/ DAS два разъема RJ-45 (MLT-3, CDDI)	NBase-Fibronics [16]
PC8741, PC8742, PC8743, PC8744	4 сетевые карты PCI: SAS разъем RJ-45 (MLT-3, CDDI) / SAS разъем Duplex SC mm / DAS два разъема Duplex SC mm / DAS два разъема RJ-45 (MLT-3, CDDI);	
PT-SBS600	Семейство сетевых карт SBus: SAS разъем Duplex SC mm/ SAS разъем RJ-45 (MLT-3, CDDI) / DAS два разъема Duplex SC mm, питание OBS/ DAS два разъема RJ-45 (MLT-3, CDDI). Поддержка ОС Windows NT, Solaris x.86 и Solaris 2.x.	Performance Technologies [17]
SK-NET FDDI SBus (Model SK-56x1)	Семейство из двух карт Sbus, типа SAS: разъем Duplex SC mm или RJ-45 (MLT-3, CDDI). Поддержка ОС Solaris x.86 и Solaris 2.x.	SysKconnect [18]
Концентраторы и коммутаторы FDDI		
SmartSwitch 9000	Семейство модульных магистральных коммутаторов/ концентраторов (шасси 6, 14 слотов). FDDI модули:	Cabletron Systems [19]
9F241-12 9F206-02 9F426-03	FDDI MicroLAN module, 12 M-портов Duplex SC mm FDDI Enhanced Repeater module, 1 порт FDDI DAS – 2 MIC mm High-Density FDDI SmartSwitch module, 3 FDDI DAS – 6 портов MIC mm, поддержка полного дуплекса по всем DAS портам, до – 42 коммутируемых колец FDDI (14 слотов)	
GIGAswitch/FDDI	Модульный коммутатор (шасси 14 слотов, включая 1 модуль управления). Возможна IP коммутация. FDDI модули:	DEC [20]
FGL-2 FGL-4	2 порта MIC mm, в конфигурации 2 x SAS или 1 DAS 4 порта MIC mm, в конфигурации 4 x SAS	
GigaHUB XH152	Модульный концентратор (шасси 14 слотов, включая 1 модуль управления). FDDI модули:	NBase-Fibronics [16]
LC380 LC382 LC383	FDDI DAS модуль 2 x Duplex SC (mm/sm) FDDI концентратор модуль 9 x RJ-45 (MLT-3, CDDI) FDDI концентратор модуль 9 x Duplex SC (mm/sm)	
Конвертеры с многомодового на одномодовое волокно (MM/SM Converters)		
N320FD- I/II-x*	Двухпортовый mm/sm FDDI медиа конвертер, x- ST/FC/ SC (совместимый со стандартом ANSI X3T9.5), I - расстояние по одномодовому волокну до 20 км, II - до 40 км	NBase [21]
OM320, OM330*	Двухпортовый mm/sm FDDI медиа конвертер (разъемы SC), расстояние по одномодовому волокну OM320 - до 20 км, OM330 - до 30 км	Net Optics [22]
Конвертеры FDDI с витой пары на оптическое волокно (FDDI UTP/FO Converters)**		
FD-CD-01, FD-CD-01(SM)	FDDI конвертеры: FD-CD-01 – RJ-45/SC mm, FD-CD-01(SM)- RJ-45/SC sm Стандарты: FDDI ANSI X3T12, FDDI TP-PMD	Transition networks [23]

* Указанные конвертеры являются средонезависимыми, в том смысле, что могут поддерживать разную частоту модуляции, вплоть до передачи потока STM-1 (155 Мбит/с, – 194 МГц).

** В целом конвертеры FDDI UTP/FO по архитектуре аналогичны конвертерам Fast Ethernet UTP/FO, поскольку технология Fast Ethernet заимствовала стандарты FDDI PMD на волокно и неэкранированную витую пару.



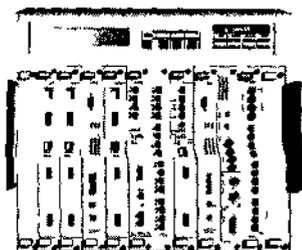
а) GIGAswitch/FDDI



б) SmartSwitch 9000



в) Карта 9F426-03 для SS9000



г) GigaHUB (XH152)



д) Карты LC383/2 для XH152



е) FDDI мм/см конвертер N320FD

Рис. 6.25. Внешний вид некоторых FDDI устройств

Литература к главе 6

1. A. Mills. Understanding FDDI: A 100 Mbps Solutions for Today's Corporate LANs, Prentice Hall, 1995. – 277 p.
2. Welcome – FDDI Frequently Asked Questions (FAQ), United States Navy Computer, 1996, <http://sholeh.nswc.navy.mil/x3t12/FDDIFAQ.html>
3. Our Testing Environment and Capabilities, FDDI Consortium, 1998, <http://www.iol.unh.edu/consortiums/fddi/index.html>
4. Б. Нанс. Программирование в локальных сетях. – Пермь: Изд-во Пермь, 1992. – 756 с.
5. ANSI X3T12 (FDDI) Home Page, United States Navy Computer, 1996, <http://sholeh.nswc.navy.mil/x3t12/>
6. "Высокоскоростные технологии ЛВС", Центр Информационных Технологий, 1997, <http://www.citforum.ru/nets/lvs/contents.html>
7. Increase FDDI Reliability with Bypass Switches, AMP, 1997 http://www.amp.com/product/articles/dd68_a.html
8. FDDI Dual Bypass Switch, DiCon Fiberoptics Inc., 1997, <http://www.diconfiberoptics.com/dicon.htm>
9. Active and Passive Fiber Optic Components, Fiber Optic Product Catalog, Molex, 1998, <http://www.molex.com/product/fiber/fiber.html>

7. Сети Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet

Сегодня термин Ethernet стал синонимом стандарта IEEE 802.3, определяющего сеть передачи данных со случайным методом доступа к среде с разрешением конфликтов (коллизий) CSMA/CD. Из-за значительной простоты стандарта и, как следствие, низкой стоимости оборудования, Ethernet нашел широкое применение в современных сетях, о чем свидетельствует непрерывный рост инсталляций сетей как на основе стандарта Ethernet, так и на основе Fast Ethernet – эффективного и недорогого преемника Ethernet.

Первоначально стандарт Ethernet разрабатывался компанией Xerox и базировался на системе ALOHA [1]. Это была сеть, использующая протокол CSMA/CD, но скорость передачи составляла всего лишь 2,94 Мбит/с. Сеть объединяла более 100 рабочих станций в пределах одного километра. Сильному дальнейшему развитию способствовала совместная разработка группой из трех компаний Xerox, DEC и Intel улучшенного стандарта Ethernet, обеспечивающего скорость передачи 10 Мбит/с [2]. Именно этот стандарт стал базой для современного международного стандарта IEEE 802.3.

Претерпели изменения и физические интерфейсы. Так, если на этапе внедрения стандарта Ethernet главные интерфейсы базировались на тонком и толстом коаксиальных кабелях, то сейчас предпочтение отдается неэкранированной витой паре UTP cat.5 и оптическому волокну. Поскольку современные кабельные структуры сетей носят смешанный характер, то далее будут рассматриваться оба этих современных интерфейса.

Основные этапы эволюции показаны на рис. 7.1. Когда в 1980 году компании Xerox, DEC и Intel опубликовали стандарт DIX¹ Ethernet, скорость передачи 10 Мбит/с считалась гигантской и достаточной для любых приложений. С тех пор, по мере совершенствования компьютерных технологий, появились потребности в значительно большей полосе пропускания. И сегодня стандарт Ethernet в его оригинальном виде, использующий логическую топологию "шина" с одним коллизийным доменом, остается приемлемым разве что для построения локальных сетей на небольших предприятиях. Первая половина 90-х годов характеризуется внедрением и стремительным ростом сетевых коммутаторов Ethernet, позволяющих строить магистраль в точке (collapsed backbones) и, тем самым, сильно разгрузить крупные сети. *Дальнейшее появление коммутаторов и сетевых карт, поддерживающих дуплексную передачу – передачу данных в обоих направлениях одновременно без коллизий при логической топологии "точка-точка", – сняло ограничение на расстояние и дало полную свободу применению волоконно-оптических линий связи и построению протяженных сегментов между коммутаторами Ethernet.*

В 1995 году принимается стандарт IEEE 802.3u Fast Ethernet, обеспечивающий скорость передачи 100 Мбит/с. На сетевом рынке появляется множество новых продуктов: от повторителей Fast Ethernet до сетевых карт и коммутаторов, поддерживающих скорости 10/100 Мбит/с и дуплексные режимы по всем портам. И, наконец, появляются спецификации стандарта Gigabit Ethernet IEEE 802.3z и IEEE 802.3ab.

В силу специфики излагаемого материала, большое внимание уделяется волоконно-оптическому интерфейсу, тем более, что с ростом скорости передачи (по мере перехода на Fast Ethernet и Gigabit Ethernet) и с увеличением протяженности сегментов (до величин от нескольких до нескольких десятков километров) приемлемые альтернативные решения отсутствуют.

При строительстве сети главную практическую ценность обычно имеют инструкции, правила, которых следует придерживаться для нормального функционирования сети, например: длины сегментов, диаметр коллизийного домена, количество рабочих станций в сети, и т.п. Однако сами по себе такие инструкции трудно воспринимать, если не иметь представления о стандарте, который, собственно, является первопричиной появления правил и инструкций. Поэтому вначале рассматриваются основные спецификации стандарта Ethernet. Описание более современных стандартов Fast Ethernet и Gigabit Ethernet строится на основе рассмотрения отличительных черт и модернизаций, преимуществ и недостатков по сравнению с предшественником. В завершении главы приведены примеры конфигураций сетей по мере роста от Ethernet до Gigabit Ethernet, а также краткие характеристики некоторых новых протоколов, в частности 802.3x, 802.1Q, RSVP, вооружившись которыми Gigabit Ethernet становится полноправной магистральной волоконно-оптической технологией.

¹ DIX аббревиатура от DEC-Intel-Xerox.

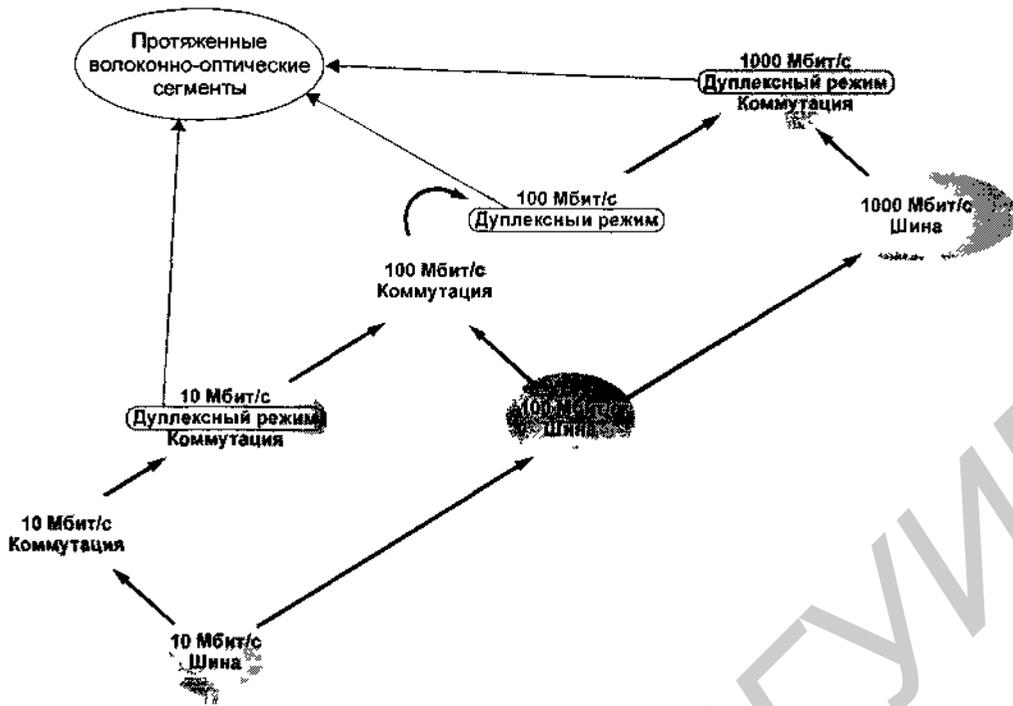


Рис. 7.1. Этапы эволюции стандарта Ethernet

7.1. Сети Ethernet

Выделим три главных элемента стандарта: формат кадра, систему сигнализации между рабочими станциями при осуществлении передачи данных по протоколу CSMA/CD и набор физических сред: коаксиальный кабель, витая пара, волоконно-оптический кабель [3].

Формат кадра Ethernet

На рис. 7.2 показан формат кадра Ethernet. Поля имеют следующие назначения:

- **Преамбула:** 7 байт, каждый из которых представляет чередование единиц и нулей 10101010. Преамбула позволяет установить битовую синхронизацию на приемной стороне.
- **Ограничитель начала кадра (SFD, start frame delimiter):** 1 байт, последовательность 10101011, указывает, что далее последуют информационные поля кадра. Этот байт можно относить к преамбуле.
- **Адрес назначения (DA, destination address):** 6 байт, указывает MAC-адрес станции (MAC-адреса станций), для которой (которых) предназначен этот кадр. Это может быть единственный физический адрес (unicast), групповой адрес (multicast) или широковещательный адрес (broadcast).
- **Адрес отправителя (SA, source address):** 6 байт, указывает MAC-адрес станции, которая посылает кадр.
- **Поле типа или длины кадра (T or L, type or length):** 2 байта. Существуют два базовых формата кадра Ethernet (в английской терминологии raw formats – сырые форматы) – Ethernet II и IEEE 802.3 (рис. 7.2), причем различное назначение у них имеет именно рассматриваемое поле. Для кадра Ethernet II в этом поле содержится информация о типе кадра. Ниже приведены значения в шестнадцатеричной системе этого поля для некоторых распространенных сетевых протоколов: 0x0800 для IP, 0x0806 для ARP, 0x809B для AppleTalk, 0x0600 для XNS, и 0x8137 для IPX/SPX. С указанием в этом поле конкретного значения (одного из перечисленных) кадр приобретает реальный формат, и в таком формате кадр уже может распространяться по сети.
- Для кадра IEEE 802.3 в этом поле содержится выраженный в байтах размер следующего поля – поля данных (LLC Data). Если эта цифра приводит к общей длине кадра меньше

Дадим определение:

множество всех станций сети, одновременная передача любой пары из которых приводит к коллизии, называется **коллизийным доменом** (collision domain).

Из-за коллизии (конфликта) могут возникать непредсказуемые задержки при распространении кадров по сети, особенно при большой загрузке сети (много станций пытаются одновременно передавать внутри коллизийного домена, > 20-25), и при большом диаметре коллизийного домена (> 2 км). Поэтому при построении сетей желательно избегать таких экстремальных режимов работы.

Проблема построения протокола, способного наиболее рационально разрешать коллизии, и оптимизирующего работу сети при больших нагрузках, была одной из ключевых на этапе формирования стандарта Ethernet IEEE 802.3. Первоначально рассматривались три основных подхода в качестве кандидатов для реализации стандарта случайного доступа к среде (рис. 7.3): непостоянный, 1-постоянный и р-постоянный [5].

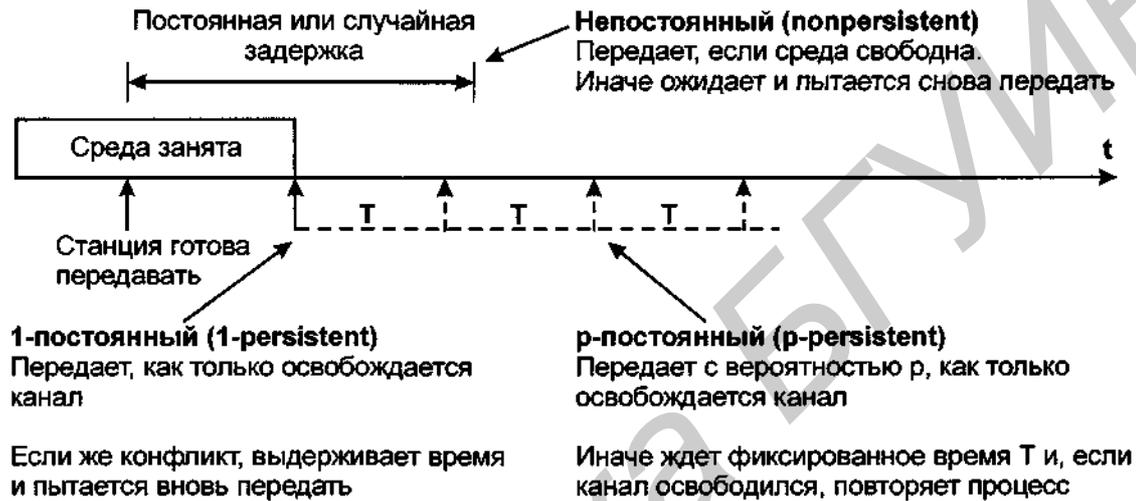


Рис. 7.3. Алгоритмы множественного случайного доступа (CSMA) и выдержка времени в конфликтной ситуации (collision backoff)

Непостоянный (nonpersistent) алгоритм. При этом алгоритме станция, желающая передать, руководствуется следующими правилами.

1. Прослушивает среду, и, если среда свободна (т.е. если нет другой передачи или нет сигнала коллизии), передает, в противном случае – среда занята – переходит к шагу 2.
2. Если среда занята, ждет случайное (в соответствии с определенной кривой распределения вероятностей) время и возвращается к шагу 1.

Использование случайного значения ожидания при занятой среде уменьшает вероятность образования коллизий. Действительно, предположим в противном случае, что две станции практически одновременно собрались передавать, в то время, как третья уже осуществляет передачу. Если первые две не имели бы случайного времени ожидания перед началом передачи (в случае, если среда оказалась занятой), а только прослушивали среду и ждали, когда она освободится, то после прекращения передачи третьей станцией первые две начали бы передавать одновременно, что неизбежно приводило бы к коллизиям. Таким образом, случайное ожидание устраняет возможность образования таких коллизий. Однако неудобство этого метода проявляется в неэффективном использовании полосы пропускания канала. Поскольку может случиться, что к тому моменту, когда среда освободится, станция, желающая передавать, еще будет продолжать ожидать некоторое случайное время, прежде чем решится прослушивать среду, поскольку перед этим уже прослушивала среду, которая оказалась занятой. В итоге канал будет простаивать какое-то время, даже если только одна станция ожидает передачи.

1-постоянный (1-persistent) алгоритм. Для сокращения времени, когда среда не занята, мог бы использоваться 1-постоянный алгоритм. При этом алгоритме станция, желающая передать, руководствуется следующими правилами.

1. Прослушивает среду, и, если среда не занята, передает, в противном случае переходит к шагу 2;
2. Если среда занята, продолжает прослушивать среду до тех пор, пока среда не освободится, и, как только среда освобождается, сразу же начинает передавать.

Сравнивая непостоянный и 1-постоянный алгоритмы, можно сказать, что в 1-постоянном алгоритме станция, желающая передавать, ведет себя более "эгоистично". Поэтому, если две или более станций ожидают передачи (ждут, пока не освободится среда), коллизия, можно сказать, будет гарантирована. После коллизии станции начинают решать, что им делать дальше.

P-постоянный (p-persistent) алгоритм. Правила этого алгоритма следующие:

1. Если среда свободна, станция с вероятностью p сразу же начинает передачу или с вероятностью $(1-p)$ ожидает в течение интервала времени T . Интервал T обычно берется равным максимальному времени распространения сигнала из конца в конец сети;
2. Если среда занята, станция продолжает прослушивание до тех пор, пока среда не освободится, затем переходит к шагу 1;
3. Если передача задержана на один интервал T , станция возвращается к шагу 1.

И здесь возникает вопрос выбора наиболее эффективного значения параметра p . Главная проблема, как избежать нестабильности при высоких нагрузках. Рассмотрим ситуацию, при которой n станций намерены передать кадры, в то время, как уже идет передача. По окончании передачи ожидаемое количество станций, которые попытаются передавать, будет равно произведению количества желающих передавать станций на вероятность передачи, то есть np . Если $np > 1$, то в среднем несколько станций будут пытаться передать сразу, что вызовет коллизию. Более того, как только коллизия будет обнаружена, все станции вновь перейдут к шагу 1, что вызовет повторную коллизию. В худшем случае, новые станции, желающие передавать, могут добавиться к n , что еще больше усугубит ситуацию, приведя, в конечном итоге, к непрерывной коллизии и нулевой пропускной способности. Во избежании такой катастрофы np должно быть меньше единицы. Если же сеть подвержена возникновению состояний, когда много станций одновременно желают передавать, то необходимо уменьшать p . С другой стороны, когда p становится слишком малым, даже отдельная станция может прождать в среднем $(1-p)/p$ интервалов T , прежде чем осуществит передачу. Так если $p=0,1$, то средний простой, предшествующий передаче, составит $9T$.

Протокол CSMA/CD

Протокол CSMA/CD [3] воплотил в себе идеи вышеперечисленных алгоритмов и добавил важный элемент – разрешение коллизий. Поскольку коллизия разрушает все передаваемые в момент ее образования кадры, то и нет смысла станциям продолжать дальнейшую передачу своих кадров, коль скоро они (станции) обнаружили коллизии. В противном случае, значительной была бы потеря времени при передаче длинных кадров. Поэтому для своевременного обнаружения коллизии станция прослушивает среду на всем протяжении собственной передачи. Приведем основные правила алгоритма CSMA/CD для передающей станции.

Передача кадра (рис. 7.4 а):

1. Станция, собравшаяся передавать, прослушивает среду, и передает, если среда свободна. В противном случае (т.е. если среда занята), переходит к шагу 2. При передаче нескольких кадров подряд станция выдерживает определенную паузу между посылками кадров – межкадровый интервал, причем после каждой такой паузы перед отправкой следующего кадра станция вновь прослушивает среду (возвращение на начало шага 1);
2. Если среда занята, станция продолжает прослушивать среду до тех пор, пока среда не станет свободной, и затем сразу же начинает передачу;
3. Каждая станция, ведущая передачу, прослушивает среду, и, в случае обнаружения коллизии, не прекращает сразу же передачу, а сначала передает короткий специальный сигнал коллизии – jam-сигнал, информируя другие станции о коллизии, и прекращает передачу;
4. После передачи jam-сигнала станция замолкает и ждет некоторое произвольное время в соответствии с правилом бинарной экспоненциальной задержки, а затем возвращается к шагу 1.

Межкадровый интервал IFG (*interframe gap*) составляет 9,6 мкм (12 байт). С одной стороны, он необходим для того, чтобы принимающая станция могла корректно завершить прием кадра. Кроме этого, если бы станция передавала кадры непрерывно, она бы полностью захватила канал и, тем самым, лишила другие станции возможности передачи.

Jam-сигнал (jamming – дословно глушение). Передача jam-сигнала гарантирует, что ни один кадр не будет потерян, так как все узлы, которые передавали кадры до возникновения коллизии, приняв jam-сигнал, прервут свои передачи и замолкнут в ожидании новой попытки передать кадры. Jam-сигнал должен быть достаточной длины, чтобы он дошел до самых удаленных станций коллизионного домена с учетом дополнительной задержки SF (*safety margin*) на возможных повторителях. Содержание jam-сигнала не принципиально за исключением того, что оно не должно соответствовать значению поля CRC частично переданного кадра (802.3), и первые 62 бита должны представлять чередование 1 и 0 со стартовым битом 1.

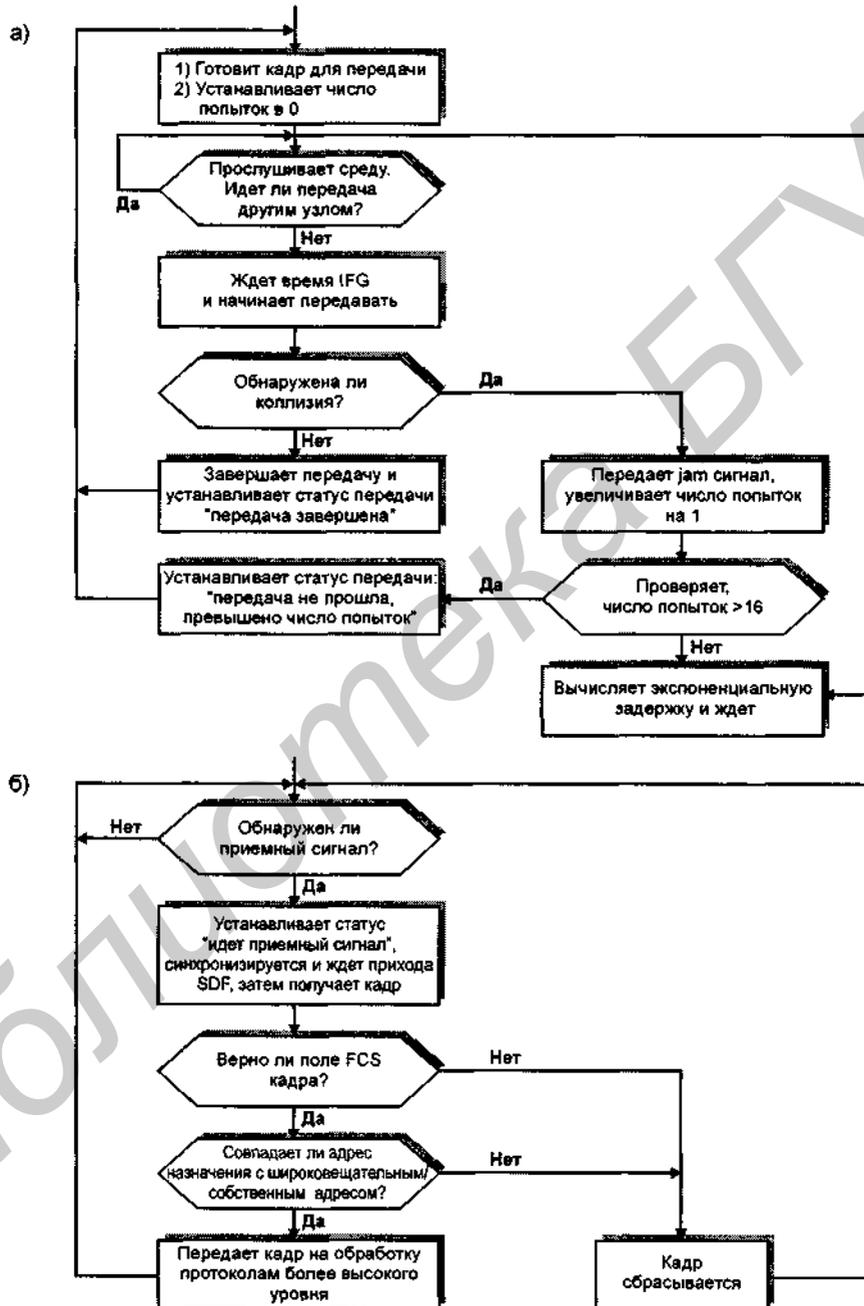


Рис. 7.4. Структурная схема алгоритма CSMA/CD (уровень MAC):
а) при передаче кадра станцией; б) при приеме кадра станцией

На рис. 7.5 проиллюстрирован процесс обнаружения коллизии применительно к топологии "шина" (на основе тонкого или толстого коаксиального кабеля (стандарты 10Base5 и 10Base2 соответственно).

В момент времени t_0 узел **A** (DTE **A**) начинает передачу, естественно прослушивая свой же передаваемый сигнал. В момент времени t_1 , когда кадр почти дошел до узла **B** (DTE **B**), этот узел, не зная о том, что уже идет передача, сам начинает передавать. В момент времени $t_2 = t_1 + \Delta$, узел **B** обнаруживает коллизию (увеличивается постоянная составляющей электрического сигнала в прослушиваемой линии). После этого узел **B** передает jam-сигнал и прекращает передачу. В момент времени t_3 сигнал коллизии доходит до узла **A**, после чего **A** также передает jam-сигнал и прекращает передачу.

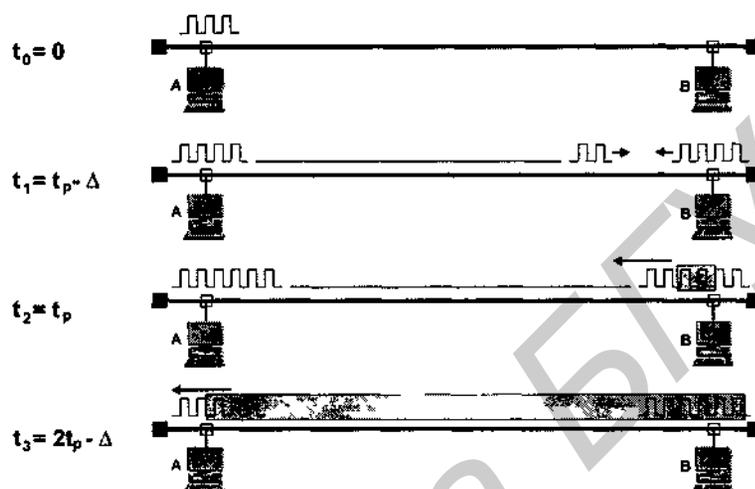


Рис. 7.5. Обнаружение коллизии в шине при использовании схемы CSMA/CD стандарта Ethernet

По стандарту Ethernet узел не может передавать очень короткие кадры, или, иными словами, вести очень короткие передачи. Как говорилось при описании формата кадра, даже если поле данных не заполнено до конца, то появляется специальное дополнительное поле, удлиняющее кадр до минимальной длины 64 байта без учета преамбулы.

Время канала ST (slot time) – это минимальное время, в течение которого узел обязан вести передачу, занимать канал. Это время соответствует передаче кадра минимального допустимого размера, принятого стандартом Ethernet IEEE 802.3. Время канала связано с максимальным допустимым расстоянием между узлами сети – диаметром коллизийного домена. Допустим, что в приведенном выше примере реализуется наихудший сценарий, когда станции **A** и **B** удалены друг от друга на максимальное расстояние. Время распространения сигнала от **A** до **B** обозначим через t_p . Узел **A** начинает передавать в нулевой момент времени. Узел **B** начинает передавать в момент времени $t_1 = t_p - \Delta$ и обнаруживает коллизию спустя интервал Δ после начала своей передачи. Узел **A** обнаруживает коллизию в момент времени $t_3 = 2t_p - \Delta$. Для того, чтобы кадр, испущенный **A**, не был потерян, необходимо, чтобы узел **A** не прекращал вести передачу к этому моменту, так как тогда, обнаружив коллизию, узел **A** будет знать, что его кадр не дошел, и попытается передавать его повторно. В противном случае, кадр будет потерян. Максимальное время, спустя которое с момента начала передачи узел **A** еще может обнаружить коллизию, равно $2t_p$ – это время называется задержкой на двойном пробеге RTD (round-trip delay). В более общем случае, RTD определяет суммарную задержку, связанную как с задержкой из-за конечной длины сегментов, так и с задержкой, возникающей при обработке кадров на физическом уровне промежуточных повторителей и конечных узлов сети. Далее удобно использовать также другую единицу измерения времени:

битовое время BT (bit time). Время в 1 BT соответствует времени, необходимому для передачи одного бита, т.е. 0,1 мкс при скорости 10 Мбит/с.

Стандартом Ethernet регламентированы следующие правила обнаружения коллизии конечным узлом сети [4]:

1. Узел А должен обнаружить коллизию до того, как передаст свой 512-й бит, включая биты преамбулы;
2. Узел А должен прекратить передачу раньше, чем будет передан кадр минимальной длины – передано 576 бит (512 бит после ограничителя начала кадра SFD);
3. Перекрытие между передачами узлов А и В – битовый интервал, начиная с момента передачи первого бита преамбулы узлом А и заканчивая приемом узлом А последнего бита, испущенного узлом В, – должно быть меньше, чем 575 BT.

Последнее условие для сети Ethernet является наиболее важным, поскольку его выполнение автоматически влечет выполнение и первых двух. Это третье условие задает ограничение на диаметр сети. Применительно к задержке на двойном пробеге RTD третье условие можно сформулировать в виде: $RTD < 575 BT$.

При передаче больших кадров, например 1500 байт, коллизия, если она вообще возникнет, обнаруживается практически в самом начале передачи, не позднее первых 64 переданных байт (если коллизия не возникла в это время, то позже она уже не возникнет, поскольку все станции прослушивают линию и, "слыша" передачу, будут молчать). Так как jam-сигнал значительно короче полного размера кадра, то при использовании алгоритма CSMA/CD количество в холостую израсходованной емкости канала сокращается до времени, требуемого на обнаружение коллизии. Раннее обнаружение коллизий приводит к более эффективному использованию канала. Позднее обнаружение коллизий, свойственное более протяженным сетям, когда диаметр коллизионного домена составляет несколько километров, снижает эффективность работы сети. На основании упрощенной теоретической модели поведения загруженной сети (в предположении большого числа одновременно передающих станций и фиксированной минимальной длины передаваемых кадров у всех станций) можно выразить производительность сети U через отношение RTD/ST , [5]:

$$U = \frac{1}{1 + (e - 1)RDT/ST} \approx \frac{1}{1 + 1,72RDT/ST}$$

где e – основание натурального логарифма. На производительность сети влияет размер транслируемых кадров и диаметр сети. Производительность в наихудшем случае (когда $RDT = ST$) составляет около 37%, а в наилучшем случае (когда RDT много меньше, чем ST) стремится к 1. Хотя формула и выведена в пределе большого числа станций, пытающихся передавать одновременно, она не учитывает особенностей алгоритма усеченной бинарной экспоненциальной задержки, рассмотренного ниже, и не справедлива для сильно перегруженной коллизиями сети, например, когда станций, желающих передавать, становится больше 15.

Усеченная бинарная экспоненциальная задержка. Алгоритм, принятый в стандарте IEEE 802.3 CSMA/CD, наиболее близок к 1-постоянному алгоритму, но отличается дополнительным элементом – усеченной бинарной экспоненциальной задержкой. При возникновении коллизии станция подсчитывает, сколько раз подряд при отправке пакета возникает коллизия. Поскольку повторяющиеся коллизии свидетельствуют о высокой загруженности среды, MAC-узел пытается увеличивать задержку между повторными попытками передачи кадра. Соответствующая процедура увеличения интервалов времени подчиняется правилу усеченной бинарной экспоненциальной задержки и работает следующим образом.

Количество слотовых времен (интервалов по 51,2 мкс), которое станция ждет перед тем, как совершить N -ую попытку передачи ($N - 1$ попыток потерпели фиаско из-за возникновения коллизий во время передачи), представляет случайное целое число R с однородной функцией распределения в интервале $0 \leq R < 2^K$, где $K = \min(N, BL)$, и BL (backoff limit) – установленная стандартом предельная задержка, равная 10. Если число последовательных безуспешных попыток отправить кадр доходит до 16, то есть коллизия возникает 16 раз подряд, то кадр сбрасывается.

Алгоритм CSMA/CD с использованием усеченной бинарной экспоненциальной задержки признан лучшим среди множества алгоритмов случайного доступа и обеспечивает эффективную работу сети как при малых, так и при средних нагрузках. При больших нагрузках следует

отметить два недостатка. Во-первых, при большом числе коллизий станция 1, которая впервые собирается отправить кадр (до этого не пыталась передавать кадры), имеет преимущество перед станцией 2, которая уже несколько раз безуспешно пыталась передать кадр, натываясь на коллизии, поскольку станция 2 ожидает значительное время перед последующими попытками в соответствии с правилом бинарной экспоненциальной задержки. Таким образом, может наблюдаться нерегулярность передачи кадров, что нежелательно для зависящих от времени приложений. Во-вторых, при большой загруженности снижается эффективность работы сети в целом. Оценки показывают, что при одновременной передаче 25 станциями общая полоса пропускания снижается примерно в 2 раза [6]. Но число станций в коллизийном домене может быть больше, поскольку далеко не все они одновременно будут обращаться к среде.

Прием кадра (рис. 7.4 б). Принимающая станция или другое сетевое устройство, например концентратор или коммутатор, первым делом синхронизируется по преамбуле и затем преобразовывает манчестерский код в бинарную форму (на физическом уровне). Далее обрабатывается бинарный поток.

На уровне MAC оставшиеся биты преамбулы сбрасываются, а станция читает адрес назначения и сравнивает его со своим собственным. Если адреса совпадают, то поля кадра, за исключением преамбулы, SDF и FCS помещаются в буфер и вычисляется контрольная сумма, которая сравнивается с полем контрольной последовательности кадра FCS (используется метод циклического суммирования CRC-32). Если они равны, то содержимое буфера передается протоколу более высокого уровня. В противном случае кадр сбрасывается. Возникновение коллизии при приеме кадра обнаруживается либо по изменению электрического потенциала (если используется коаксиальный сегмент), либо по факту приема дефектного кадра (неверная контрольная сумма), если используется витая пара или оптическое волокно. В обоих случаях принятая информация сбрасывается.

Основные функциональные параметры стандарта Ethernet приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Основные функциональные параметры Ethernet IEEE 802.3

Битовая скорость, Мбит/с	10 (Манчестерское кодирование)
Время слота, мкс (BT)	51,2 (512)
Межкадровый интервал, мкс (BT)	9,6 (96)
Предел попыток	16
Предельная задержка	10
Размер jam-сигнала, бит	32
Максимальный размер кадра, байт	1518
Минимальный размер кадра, байт	64
Длительность Jabber-сигнала, при которой повторитель останавливает передачу и изолирует сегмент, мс	20-150

Спецификации физического уровня IEEE 802.3 и типы портов

Первоначально в 1985 году, когда был опубликован стандарт IEEE 802.3, использовались только два типа передающей среды: тонкий коаксиальный кабель (диаметр 6 мм) – стандарт физического интерфейса BNC (10Base-2), и толстый коаксиальный кабель (диаметр 13 мм) – стандарт AUI (10Base-5, подключение толстого коаксиального кабеля осуществляется посредством специального трансивера). Позднее появились еще три интерфейса: на витую пару – RJ-45 (10Base-T), на коаксиальный кабель для широкополосных сетей кабельного телевидения сопротивлением 75 Ом – (10Broad36), и на оптическое многомодовое волокно (пара волокон) – соединители ST (10Base-F). Еще позже появился интерфейс на одномодовое оптическое волокно.

Стандарт 10Base-F, в свою очередь, подразделяется еще на три спецификации:

- **10Base-FP** – определяет топологию пассивной звезды на основе волоконно-оптических сегментов длиной до 1 км и числом станций до 33. При такой топологии каждый удаленный узел связывается с центральным узлом парой волокон. Сигнал из центрального

узла размножается оптическим ответвителем и идет на все удаленные узлы. Сигналы от удаленных узлов идут по обратному волокну на оптический коммутатор (комбайнер), после чего попадают на вход центрального узла. При приходе одновременно нескольких сигналов на центральный узел возникает коллизия, которая разрешается стандартным путем.

- **10Base-FB.** Эта спецификация определяет двухволоконный канал протяженностью до 2 км для создания магистральных сегментов "точка-точка" между повторителями. Она базируется на синхронной системе приема-передачи, обеспечивая восстановление таймерных характеристик и большое число (до 15) последовательно установленных повторителей.
- **10Base-FL** – определяет двухволоконный канал протяженностью до 2 км, который может использоваться для установлении соединения "точка-точка" между станцией и повторителем, или между двумя повторителями. Асинхронная система приема-передачи (в отличие от принятой в 10Base-FB) позволяет значительно снизить стоимость оборудования. Появление стандарта на одномодовое волокно дало возможность строить сверхпротяженные сегменты (до 100 км, дуплексный режим), и сделало более весомыми аргументы в пользу стандарта 10Base-FL. Эта спецификация получила наиболее широкое распространение в современных сетях Ethernet.

В табл. 7.2 указаны типы физических интерфейсов Ethernet и их основные характеристики (спецификации 10Broad36, 10Base-FP и 10Base-FB далее не рассматриваются ввиду их редкого применения).

Таблица 7.2. Основные характеристики физических интерфейсов стандарта Ethernet IEEE 802.3

Характеристика	10Base5	10Base2	10Base-T	10Base-FL
Порт устройства	AUI	BNC	RJ-45 (MDI или MDI-X)	ST
Среда передачи	Толстый коаксиальный кабель (50 Ом)	Тонкий коаксиальный кабель (50 Ом)	Витая пара UTP cat.3 и выше	Оптическое волокно mm/sm*
Сигнальный код	Манчестер	Манчестер	Манчестер	Манчестер / on-off
Физическая топология**	Шина	Шина	Звезда, дерево	Звезда, дерево
Логическая топология	Шина	Шина	Шина	Шина
Максимальная длина сегмента, м	500	185	100	mm – 2000, sm –***
Количество узлов на сегмент	100 (смешанный сегмент)	30 (смешанный сегмент)	– (соединение "точка-точка")	– (соединение "точка-точка")
Диаметр кабеля	10 мм	5 мм	0,4-0,6 мм	62,5/125 мкм, 50/125 мкм

Обозначения:

MDI – интерфейс сетевой карты; MDI-X – интерфейс портов повторителя или коммутатора.

Повторитель/коммутатор могут иметь один или несколько портов RJ-45 типа MDI.

* Длина волны 850 нм используется для многомодового (mm) ВОК – собственно стандарт 10Base-FL, и 1310 нм – для одномодового (sm) и многомодового ВОК.

** Допустима также смешанная физическая топология, однако логическая топология всегда шина.

*** При использовании одномодового ВОК длина сегмента ограничивается максимальным диаметром коллизийного домена Ethernet. Если связь осуществляется между двумя коммутаторами в режиме полного дуплекса, то расстояние может достигать 100 км.

7.2. Основные типы устройств Ethernet

AUI интерфейс и трансиверы Ethernet

Интерфейс AUI (attachment unit interface) – это средонезависимый интерфейс в рамках стандарта Ethernet, который обеспечивает вертикальное взаимодействие между подуровнем физической сигнализации PLS (physical signaling) и подуровнем физического подключения к среде PMA (physical medium attachment), рис. 7.6. Этот интерфейс может быть либо интегрирован внутри сетевого устройства (тогда наружу предоставляется один из стандартных интерфейсов, например 10Base-T, или 10Base-FL), либо сам выводится наружу.

Отдельное устройство с уровнями PMA и MDI называется *трансивером* (transceiver) – MAU (media attachment unit, элемент подключения среды). Стандартный разъем со стороны устройства, охватывающего вышележащие уровни, т.е. PLS и выше (таким устройством может быть сетевая карта, коммутатор, концентратор) называется AUI портом, а со стороны устройства, охватывающего нижележащие уровни, т.е. PMA и MDI, – портом MAU.

Порт AUI имеет 15 контактов (гнезд), и соответственно, порт MAU имеет 15-контактный (пиновый) разъем так, что трансивер может непосредственно подключаться к AUI порту сетевого устройства. Допустимо также подключение трансивера стандартным трансиверным интерфейсным кабелем толщиной 1 см, длина которого не должна превышать 50 м. На практике получили распространение упрощенные трансиверные кабели с затуханием, в 4 раза превышающим стандартное. Длина таких кабелей не должна превышать 12,5 м. Из 15 медных жил трансиверного кабеля реально используются только 10 – жилы с порядковыми номерами 4, 7, 8, 14 и 15 не используются. Питание трансивера осуществляется по этому кабелю от порта AUI.

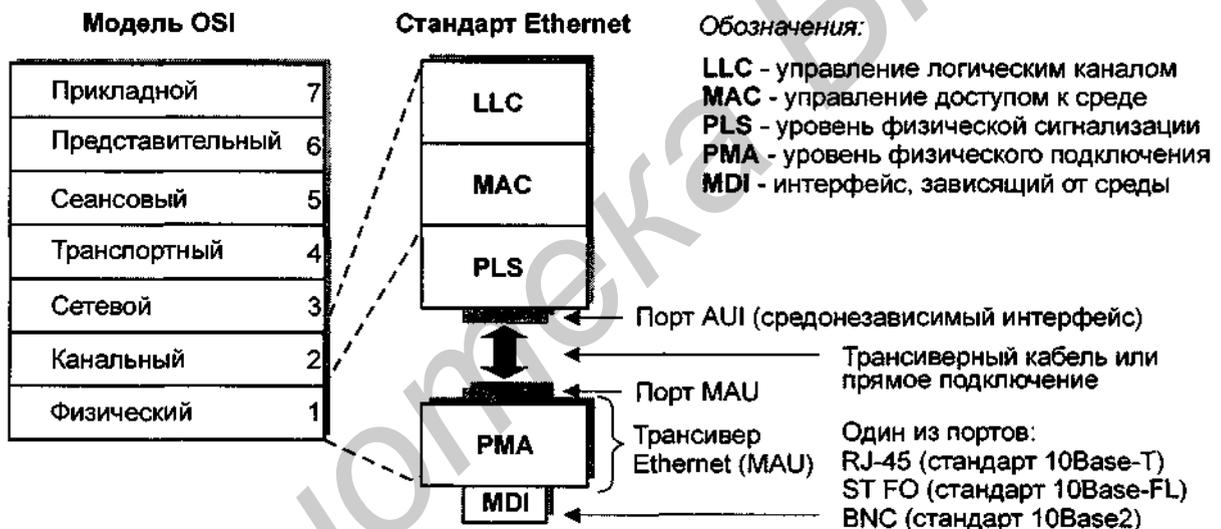


Рис. 7.6. Структура уровней стандарта Ethernet, AUI интерфейс и трансивер Ethernet

По типу средозависимого (физического) интерфейса различают четыре разновидности трансиверов MAU: на 10Base5 – трансивер, обеспечивающий подключение толстого коаксиального кабеля, обычно такой трансивер имеет специальные “вампиры” для закрепления на кабеле; на 10Base2 (BNC) – трансивер-переходник для подключения сегмента на тонком коаксиальном кабеле; на 10Base-T (RJ-45) – трансивер для подключения витой пары; на 10Base-FL (две оптические розетки ST) – оптический трансивер для подключения волоконно-оптического кабеля (ВОК). Особенностью трансиверов ВОК и на витую пару является потенциальная поддержка дуплексного режима работы.

Основными поставщиками оптических трансиверов на российском рынке являются фирмы Allied Telesyn [7], NBase [8], SVEC [9], Surecom [10], Transition Networks [11]. Фирма NBase поставляет наиболее широкий спектр оптических трансиверов, от многомодовых с расстоянием до 2 км до одномодовых с расстоянием до 110 км (таблица 7.3, рис. 7.7 а).

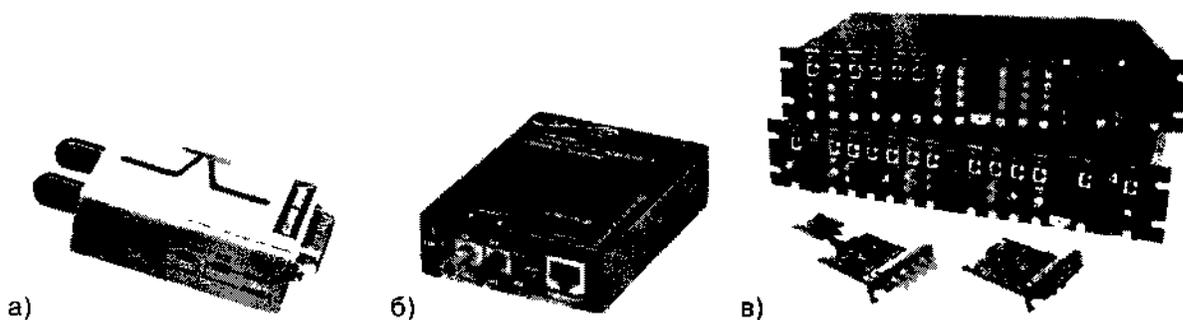


Рис. 7.7. Внешний вид: а) оптического трансивера Ethernet [8],
 б) оптического конвертера 10Base-FL/10Base-T [11]
 в) конвертерного шасси Ethernet/Fast Ethernet [12]

Таблица 7.3. Технические характеристики волоконно-оптических интерфейсов трансиверов NX300FO производства фирмы NBase

Тип трансивера NX300FO/x	FO/M	FO/MX	FO/S	FO/SX	FO/SY	FO/SZ
Тип волокна, mm – многомодовое, sm – одномодовое	mm	mm	sm	sm	sm	sm
Длина волны, нм	850	1300	1300	1300	1300	1550
Чувствительность приемника, дБм	-28	-28	-28	-28	-28	-28
Насыщение приемника, дБм	-6	-6	-6	-6	-6	-6
Диапазон значений выходной мощности, дБм (min/max)	-19/-14	-19/-14	-19/-14	-10/0	0/6	0/2
Допустимый бюджет линии, дБ (min/max)	9/14	9/14	9/14	18/28	28/34	28/30
Типичное затухание в волокне на данной длине волны, дБ/км	4	2	0,4	0,4	• 0,4	0,2
Оценка допустимого расстояния, км	0 – 2	0 – 5	0 – 18	15 – 35	30 – 60	40 – 110

Оптические конвертеры Ethernet UTP (10Base-T/10Base-FL, 10Base2/10Base-FL)

Оптические конвертеры обеспечивают преобразование электрического сигнала из витой пары и тонкого коаксиального кабеля в оптический сигнал, идущий по многомодовому или одномодовому волокну. Конвертер, в отличие от трансивера, должен иметь свой отдельный блок питания. Конвертеры могут выпускаться как в виде отдельной небольшой коробочки с внешним блоком питания, рис. 7.7 б, так и в виде шасси 19", которое может наполняться разнообразными конвертерными модулями, рис. 7.7 в. Исполнение в виде шасси особенно удобно при обустройстве центральных оптических узлов сетей с топологией звезды. Разнообразные модули позволяют подключаться как по многомодовому, так и по одномодовому волокну, как по Ethernet, так и по Fast Ethernet. Для повышения надежности, шасси некоторых производителей могут иметь резервирование по питанию.

Конвертеры 10Base-T/10Base-FL сразу преобразовывают манчестерский электрический код на входе в манчестерский оптический сигнал на выходе и наоборот, внося минимальную задержку (1-3 бита). Большинство конвертеров могут поддерживать как полудуплексную, так и дуплексную связь, причем в первом случае в устройство внедряется специальный узел обнаружения коллизий. Но фактически, даже при наличии коллизий, канал связи остается дуплексным, а работа устройства не выходит за пределы уровня MDI.

Особенностью оптических конвертеров Ethernet BNC (10Base2/10Base-FL), которые подключаются к коаксиальному сегменту обычно вместо терминатора, является ретрансляция сигнала коллизии в коаксиальный сегмент. Сигнал коллизии генерируется и передается в коаксиальный сегмент всякий раз, когда на конвертер приходят одновременно данные из коаксиального и волоконно-оптического сегментов, или приходит сигнал коллизии по коаксиаль-

ному сегменту. В последнем случае говорят, что сигнал коллизии отражается конвертером обратно в коаксиальный сегмент. Фактор отражения приводит к эффективному увеличению длины сегмента в два раза и запрещает установку на обе стороны коаксиального сегмента рассматриваемых конвертеров – с одной стороны обязательно должен быть стандартный терминатор 50 Ом.

Крупными зарубежными производителями оптических конвертеров Ethernet на витую пару являются компании: Adaptec [13], IMC [14], LANCAST, NBase, NetOptics [15], FOCI и др. Крупными поставщиками отечественных конвертеров в России являются компании Ай-Ти, "Вимком-Оптик", СКБ ИРЭ, "Телеком-Комплект-Сервис".

Рабочая станция, сетевая карта

Персональный компьютер (файл-сервер) обычно подключается к сети с помощью *сетевой карты или сетевого адаптера* NIC (network interface controller, network interface card). Такой компьютер становится сетевой *рабочей станцией*. Далее также будет использоваться термин *сетевой узел* DTE (data termination equipment, оконечное оборудования данных).

Простейший способ объединения рабочих станций в сеть (без привлечения других специализированных сетевых устройств) осуществляется на основе тонкого коаксиального кабеля – соответствующие сетевые карты должны иметь порты BNC. Однако этот способ подключения, а также способ подключения посредством толстого коаксиального кабеля через специальные трансиверы являются устаревшими и преимущественно используются лишь там, где еще сохранились коаксиальные кабельные системы. Наиболее распространенным интерфейсом считается интерфейс RJ-45 на витую пару (тип MDI). Другой интерфейс AUI может использоваться для подключения трансивера Ethernet. В частности, можно использовать оптический трансивер, если рабочая станция удалена на большое расстояние от концентратора или коммутатора.

Волоконно-оптический интерфейс также может непосредственно поддерживаться сетевой картой Ethernet (рис. 7.8).

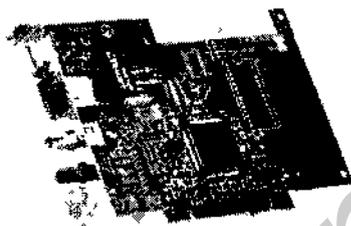


Рис. 7.8. Сетевая карта PCI с интерфейсами RJ-45/FO ST mm [7]

Каждая сетевая карта Ethernet имеет уникальный номер – MAC-адрес размером 6 байт, который зашит внутрь, и который не может быть изменен. Первые три байта поля служат для идентификации производителя сетевой карты, а последние три байта составляют уникальный номер конкретной сетевой карты.

Повторитель (концентратор)

Повторитель (repeater)² – многопортовое устройство, которое позволяет объединить несколько сегментов. Принимая кадр или сигнал коллизии по одному из своих портов, повторитель перенаправляет его во все остальные порты, рис. 7.9 а. Типы интерфейсов портов могут быть любые из вышеперечисленных. Распространены устройства с несколькими портами на витую пару (12, 16 и 24 порта RJ-45), одним портом BNC и одним портом AUI. Также популярны миниатюрные повторители, имеющие только порты на витую пару (4 x RJ-45, или 8 x RJ-45). Отметим, что повторители Ethernet работают на физическом уровне модели OSI (рис. 7.9 б), что обеспечивает их низкую стоимость и выгодно этим отличает от концентратора

² В сетях Ethernet широко распространен и другой термин – концентратор (hub).

ров FDDI (DAC, SAC, NAC), которые охватывают также уровень MAC (нижний подуровень канального уровня модели OSI)

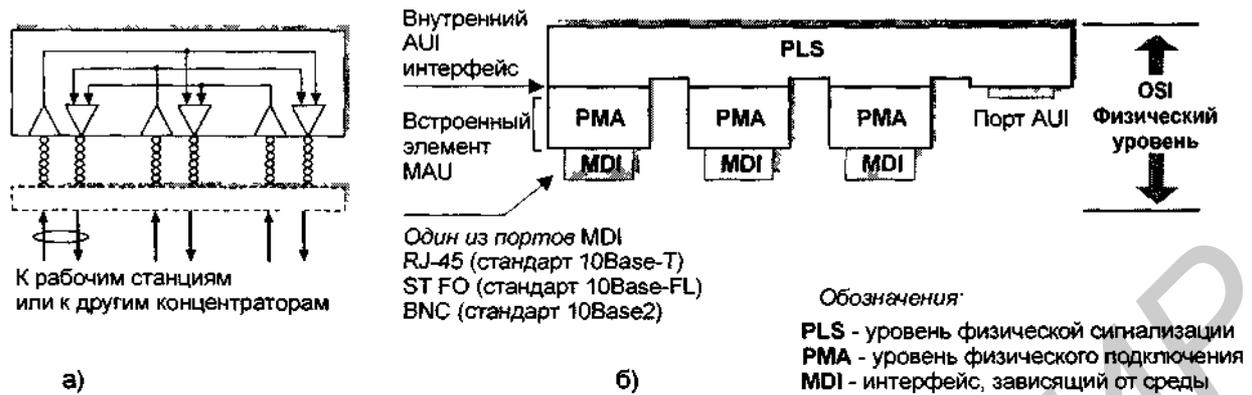


Рис. 7.9. Повторитель Ethernet: а) схема работы повторителя; б) структурная схема портов в ракурсе модели OSI

Порты RJ-45 типа MDI и MDI-X. Порт RJ-45 имеет 8 контактов. Кабель называется *прямым*, когда контакты 1-8 порта RJ-45 на одной стороне соединены с соответствующими контактами на другой стороне. Соединение прямым кабелем можно осуществлять только между разными типами портов. При этом кабель представлен четырьмя витыми парами, которые принято нумеровать следующим образом: пара 1 – контакты 1, 2; пара 2 – контакты 3, 6; пара 3 – контакты 4, 5; пара 4 – контакты 7, 8.

В стандарте 10Base-T для передачи используются только две витые пары кабеля: 1 и 2, остальные две не задействованы. Интерфейс MDI (или DTE) имеет устройство, которое осуществляет передачу по паре 1 и соответственно прием по паре 2. И наоборот, интерфейс MDI-X имеет устройство, которое осуществляет передачу по паре 2 и соответственно прием по паре 1. Для соединения двух однотипных портов RJ-45 прямой кабель не годится. Вместо него используется *кросс-кабель*, который обеспечивает соединение контактов 1-3, 2-6, 3-1, 6-2, 4-4, 5-5, 7-7, 8-8.

Большинство RJ-45 портов повторителей делаются типа MDI-X, что позволяет подключать рабочие станции при помощи прямого кабеля. Для удобства обычно один порт повторителя имеет переключатель и может поддерживать режим MDI. Так, в конфигурации сети на рис. 7.10 связь между повторителями 1 и 2, а также 3 и 2 можно осуществить прямым кабелем, если соответствующие порты RJ-45 повторителей 1 и 3 переключить в режим MDI, (порты повторителя 2 – стандартные MDI-X).

Jabber-функция. Каждому узлу сети Ethernet отводится определенное время, в течение которого он должен передать кадр. В нормальных условиях, когда нет коллизий, кадр максимальной длины 1518 байт передается рабочей станцией в течение 1,2 мс. Затем в течение времени межкадрового интервала линия остается свободной. При сильной загруженности сегмента (большое число станций пытаются передавать одновременно, и велико число коллизий) время, в течение которого линия может быть занята, сильно возрастает. Если такой загруженный сегмент подключен к одному из портов повторителя и инициирует длительный сигнал без замолкания (*jabber signal* – дословно, болтовня), то повторитель прекратит ретрансляцию данных и коллизий из этого сегмента в другие сегменты, таким образом полностью исключив перегруженный сегмент. Для этой цели концентратор поддерживает специальную *jabber-функцию*. Стандартом установлено не конкретное время срабатывания, а окно приема непрерывного сигнала от 20 до 150 мс, при котором концентратор должен исключать "плохой" сегмент. *Jabber-функция* – полезное свойство повторителя, на основе которой последний может исключать как перегруженный коллизионный сегмент, так и неисправный сегмент, или неисправную станцию, которые передают длительный сигнал, и, тем самым, предоставляет возможность работать пользователям, подключенным к другим портам [16].

Отметим, что хотя витая пара (10Base-T) и двухволоконный оптический кабель (10Base-FL) являются дуплексными средами, т.е. передача и прием сигнала происходят по независимым каналам, сам по себе повторитель Ethernet не позволяет обеспечить дуплексную передачу и

создает вокруг себя коллизийный момент. При этом сеть функционирует так, как будто реализована шинная топология. Сигнал коллизии передается концентратором во все порты, всякий раз, когда на какие-либо его два порта одновременно или почти одновременно начинают поступать данные. Из-за этого пропускная способность концентратора не может быть выше 10 Мбит/с.

Обнаружение коллизий при физической топологии типа "звезда" (стандарты 10Base-T и 10Base-FL) с использованием повторителей несколько отличается от случая, когда используется физическая топология "шина" (стандарты 10Base2 и 10Base5). Поскольку каналы связи по витой паре и по оптическому волокну дуплексные, то накладка сигналов от разных передающих устройств, свойственная коаксиальной кабельной системе и приводящая к изменению постоянной составляющей электрического потенциала в канале связи, исключена. Сигнал коллизии должен специально генерироваться устройством или устройствами, которые обнаружили коллизию. Процедура обнаружения коллизий при физической топологии "звезда" с несколькими повторителями показана на рис. 7.10.

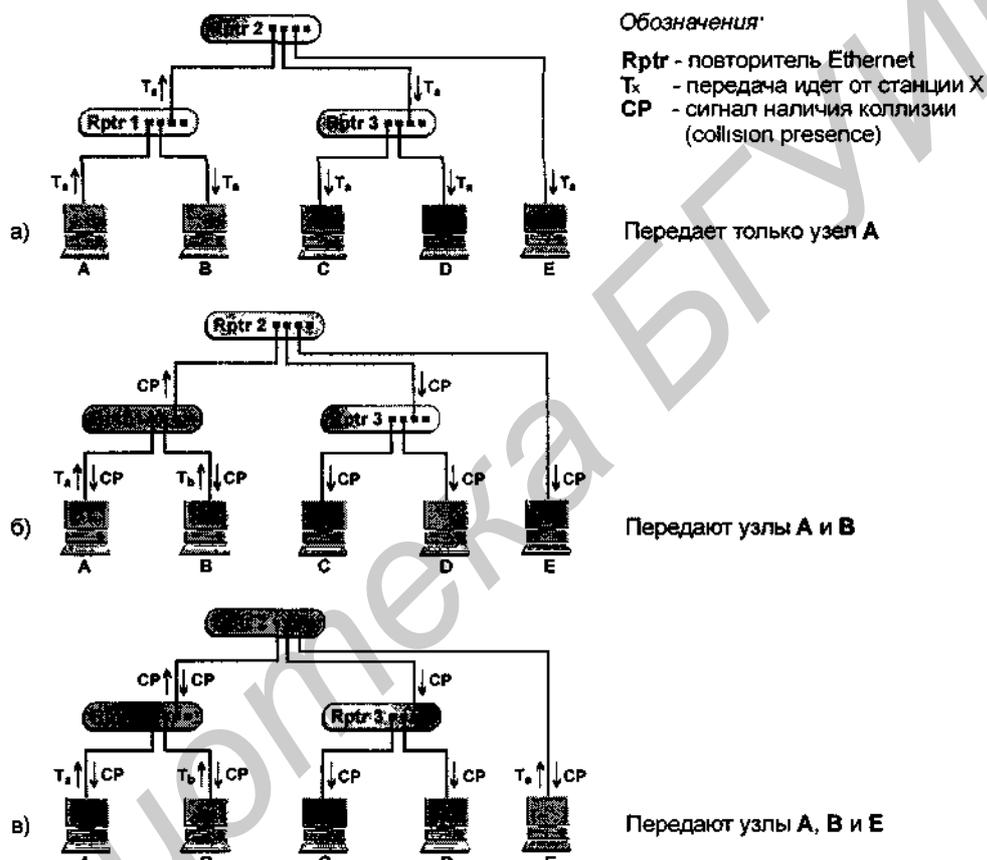


Рис. 7.10. Обнаружение коллизии в сети, когда узлы подключены по витой паре или по двухволоконному оптическому кабелю к повторителям:
 а) передает узел А; б) передают узлы А и В; в) передают узлы А, В и Е

Если передает только один узел (А), то каждый повторитель ретранслирует каждый получаемый кадр во все остальные свои порты (рис. 7.10 а). Все остальные узлы коллизийного домена регистрируют передачу кадра, но только один узел, а именно тот, которому адресован кадр (собственный MAC-адрес совпадает со значением поля "адрес назначения"), принимает кадр, и далее передает его содержимое протоколу более высокого уровня. Коллизий нет.

Если два узла (например, А и В) начинают передачу одновременно или почти одновременно, то коллизию обнаруживает повторитель 1 (рис. 7.10 б), который после этого во все свои порты выдает сигнал наличия коллизии CP (collision presence). Передаваемые узлы А и В обнаруживают коллизию, поскольку принимают другие сигналы во время своих собственных

передач, после чего отменяют передачу своих кадров, передают сигналы jam и затем замолкают. Повторитель 1 прекращает передавать сигнал CP, когда на его входные порты перестают поступать сигналы. Повторитель 2, получая сигнал CP от концентратора 1, транслирует его во все остальные порты. То же самое делает повторитель 3.

На рис. 7.6 в показан пример разрешения коллизии при передаче трех узлов А, В и Е. Зафиксирован момент, когда повторитель 2 уже обнаружил сигнал коллизии CD от повторителя 1 и передачу кадра от узла Е. Поэтому повторитель 2 выдает выходной сигнал CP во все порты. Повторитель 1, получая сигнал по трем портам, выдает сигнал CP во все свои порты.

Итак, повторитель работает следующим образом (рис. 7.10):

1. когда повторитель получает кадр или сигнал CP только на один из своих портов, он транслирует кадр или сигнал CP во все остальные порты (трансляция в остальные порты идет только до тех пор, пока поступают данные на один из портов);
2. когда повторитель получает кадры или сигналы CP по двум или более портам, он транслирует сигналы CP во все порты без исключения (трансляция во все порты сигналов CP идет только до тех пор, пока поступает сигнал на два или более портов).

Коммутатор

Коммутатор – многопортовый мост. Коммутатор работает на втором канальном уровне OSI модели. Главное назначение коммутатора – обеспечение разгрузки сети посредством локализации трафика в пределах отдельных сегментов.

Ключевым звеном коммутатора является архитектура без блокирования (non-blocking), которая позволяет установить множественные связи Ethernet между разными парами портов одновременно, причем кадры не теряются в процессе коммутации. Сам трафик между взаимодействующими сетевыми устройствами остается локализованным. Локализация осуществляется с помощью адресных таблиц, устанавливающих связь каждого порта с адресами сетевых устройств, относящихся к сегменту этого порта, рис. 7.11.

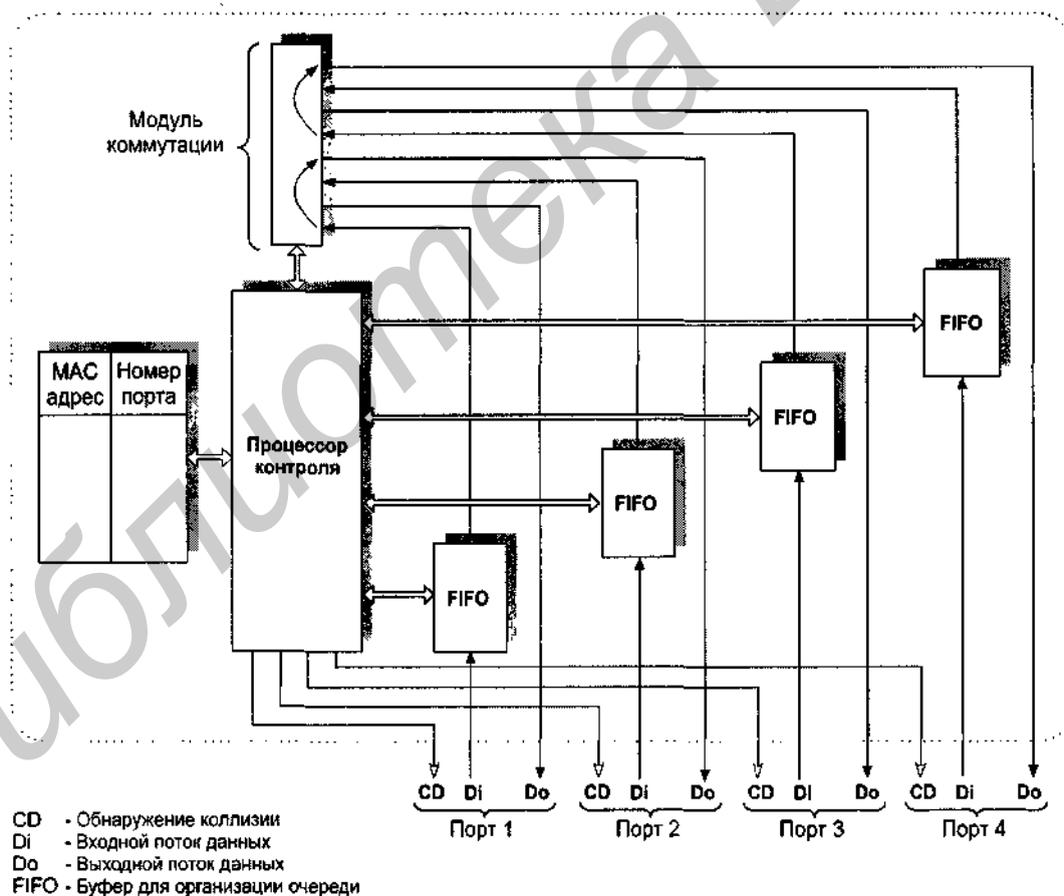


Рис. 7.11. Архитектура Ethernet коммутатора [16]

Таблица заполняется в процессе анализа коммутатором адресов станций-отправителей в передаваемых ими кадрах. Кадр передается через коммутатор локально в соответствующий порт только тогда, когда адрес станции назначения, указанный в поле кадра, уже содержится в адресной таблице этого порта. В случае отсутствия адреса станции назначения в таблице, кадр рассылается во все остальные сегменты. Если коммутатор обнаруживает, что MAC-адрес станции назначения у приходящего кадра находится в таблице MAC-адресов, приписанной за портом, по которому пришел данный кадр, то этот кадр сбрасывается – его непосредственно получит станция назначения, находящаяся в том же сегменте. И наконец, если приходящий кадр является широковещательным (broadcast), т.е. если все биты поля MAC-адреса получателя в кадре задаются равными 1, то такой кадр будет размножаться коммутатором (подобно концентратору), т.е. направляться во все остальные порты.

Различают две альтернативные технологии коммутации:

1. без буферизации (cut-through, также используется термин on-the-fly – на лету);
2. с буферизацией SAF (store-and-forward, также используется термин buffered switching – буферная коммутация).

Коммутатор, работающий без буферизации (рис. 7.12 а), практически сразу же после чтения заголовка, а именно MAC-адреса станции получения и выполнения идентификации, перенаправляет получаемый кадр в нужный порт, не дожидаясь его полного поступления. Главное преимущество такой технологии – малая задержка пакета при переадресации, которая составляет у наиболее быстрых коммутаторов 140-150 БТ (1,4-1,5 мкс). Главный недостаток – в том, что такой коммутатор будет пропускать из одной сети в другую дефектные кадры (укороченные – меньше 64 байт, или имеющие ошибки), так как выявление ошибок может происходить только после чтения всего кадра и сравнения рассчитанной контрольной суммы с той, которая занесена в поле контрольной последовательности кадра. Распространение ошибок в большей степени касается сетей Ethernet с более, чем одним подключенным пользователем на порт. В этом случае протокол Ethernet может генерировать как укороченные, так и поврежденные кадры, поскольку коммутатор не может предвидеть возникновение коллизий в сегменте, из которого поступает кадр.

Современные коммутаторы cut-through используют более продвинутый метод коммутации, который носит название ICS (interim cut-through switching – промежуточная коммутация на лету). Суть этого улучшения заключается в отфильтровывании укороченных кадров, т.е. кадров с длиной меньше 64 байт (512 бит). До тех пор, пока коммутатор не принял первые 512 бит кадра, он не начинает ретранслировать кадр в соответствующий порт. Если кадр заканчивается раньше, то содержимое буфера очищается, кадр отфильтровывается. Несмотря на увеличение задержки до 512 БТ и более (> 5,12 мкс), метод ICS значительно лучше традиционного cut-through, поскольку не пропускает укороченные кадры. К главному недостатку ICS относится возможность пропуска дефектных пакетов длиной, больше 64 байт. Поэтому коммутаторы ICS не годятся на роль магистральных коммутаторов.

Напротив, коммутатор, работающий с буферизацией (рис. 7.12 б), прежде чем начать передачу кадра в порт назначения, полностью принимает его, буферизует. Кадр сохраняется в буфере до тех пор, пока анализируется адрес назначения (destination address, DA) и сравнивается контрольная последовательность кадра FCS, после чего коммутатором принимается решение о том, в какой порт перенаправить кадр или вообще его не передавать (отфильтровать). Главное преимущество коммутации с буферизацией в том, что в этом методе гарантируется передача только "хороших" кадров. Коммутаторы с портами, работающими на разных скоростях, например Ethernet и Fast Ethernet, равно как и коммутаторы-мосты Ethernet-FDDI могут работать только на основе технологии коммутации с буферизацией. Максимальную задержку имеет кадр наибольшей длины 1512 байт ($1512 \times 64 = 96768$ БТ, ≈ 1 мс). Однако недостаток, связанный с задержкой кадра на время буферизации, не считается критичным, поскольку идет непрерывный поток кадров. Более того, основная причина задержки связана с пакетными очередями при буферизации на входных и выходных портах коммутатора. Поэтому в настоящее время большее предпочтение со стороны фирм-производителей отдается этой технологии коммутации.

Обратное давление. Входные и выходные буферы требуются коммутатору, чтобы уменьшить количество теряемых кадров при перегруженности одного из выходных портов. Однако это не дает полного спасения при длительных передачах. Например допустим, в порт 1 постоянно передаются данные из портов 2, 3 и 5. Если скорости передачи по всем портам одинаковые и равны скорости канала, то после заполнения соответствующих буферов кадры начнут теряться – коммутатор будет просто сбрасывать вновь входящие кадры по портам 2, 3

и 5. Потери пакетов означают, что посредством протокола более высокого уровня (например, на уровне сессий для протокола TCP/IP), будет производиться повторная передача кадров. Но поскольку в протоколе задействованы конечные устройства, то времена между первоначальной и повторной передачами кадра могут быть большими. Для предотвращения этого современные коммутаторы обладают функциональной возможностью контроля и управления потоками (flow control) поступающих в порты кадров. Для коммутаторов Ethernet эта функция известна как *обратное давление* (BP, back pressure), рис. 7.13. Ограниченность выходного канала по порту 1 приводит к заполнению входных буферов на портах 2, 3 и 5. Узел BP коммутатора, обнаруживая это, начинает передачу пустых кадров в те каналы, от которых переполняются входные буферы портов. Так, если переполняется входной буфер по порту 2, то пустые кадры коммутатор шлет в сегмент В, умышленно создавая коллизии в этом сегменте, в результате которых уменьшается поток кадров от передающего устройства в этом сегменте. Вместо генерации холостых кадров при отработке механизма обратного давления в коммутаторах может использоваться генерация сигнала затянувшейся передачи, причем последний метод считается более эффективным средством от потери кадров. Отметим, что механизм обратного давления можно реализовать исключительно в коммутаторах Ethernet, поскольку этот механизм напрямую использует возможности протокола CSMA/CD.

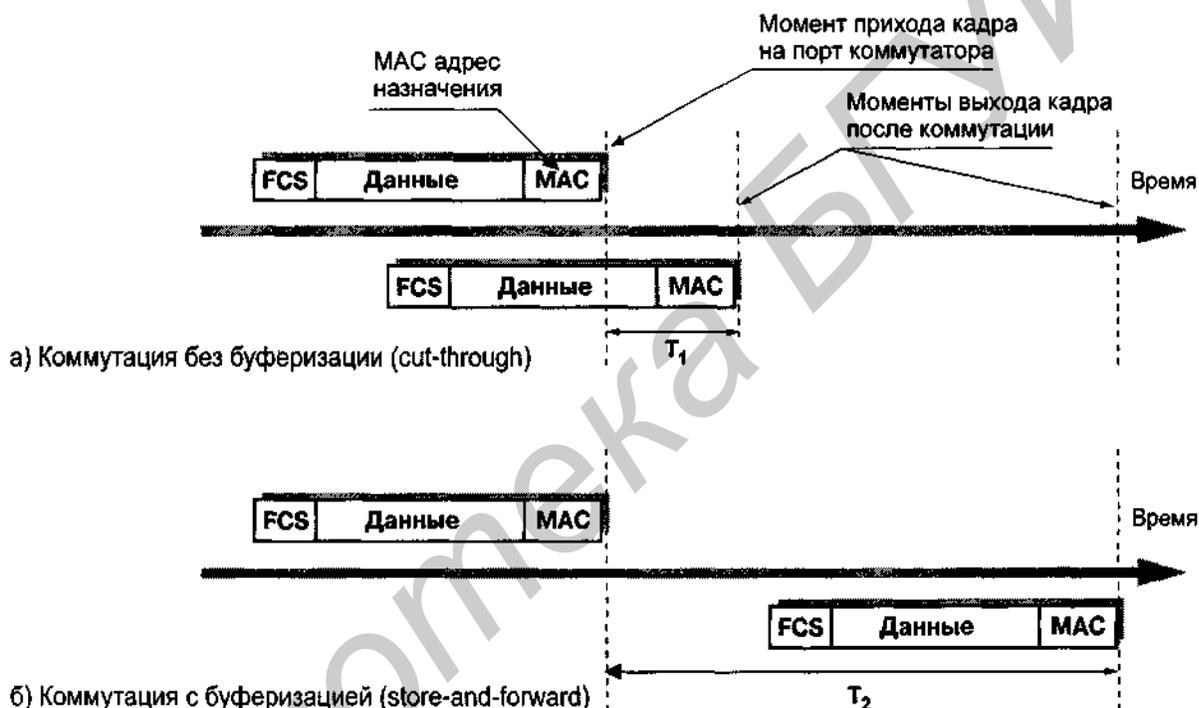


Рис. 7.12. Два метода коммутации кадров

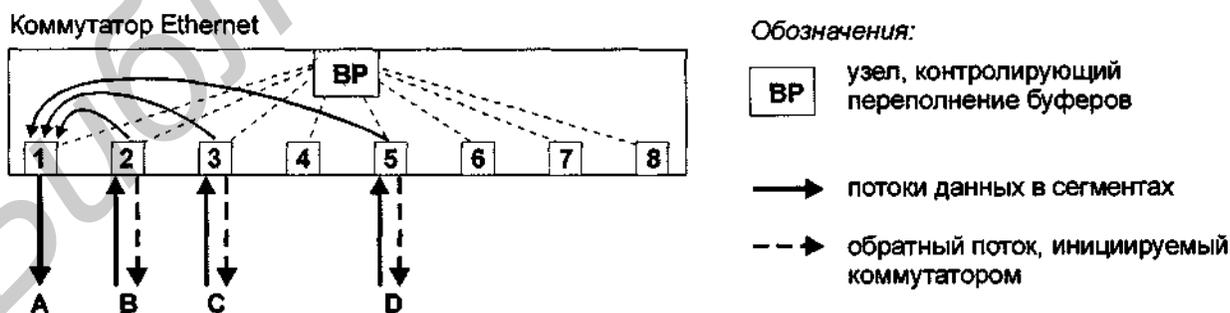


Рис. 7.13. Проявление механизма обратного давления

Порты RJ-45 коммутаторов обычно делают типа MDI-X.

Современные коммутаторы имеют множество дополнительных возможностей, среди которых: фильтрация по MAC-адресам, построение виртуальных сетей, функция контроля потока, автоконфигурирование порта 10Base-T/100Base-TX, поддержка дуплексного режима передачи.

7.3. Проектирование сети в пределах коллизийного домена Ethernet

При проектировании коллизийного домена сети Ethernet, особенно при большой протяженности (диаметр > 2,5 км), а также при большом числе последовательно установленных повторителей (> 2), необходимо проводить анализ параметров сети на соответствие стандарту. Отправной точкой может служить модель 1 – наиболее часто используемая при проектировании. Если параметры сети удовлетворяют этой модели, то сеть спроектирована правильно. В некоторых более сложных случаях сеть может не удовлетворять критериям модели 1. Однако это еще не значит, что сеть спроектирована неверно. Тогда следует проводить более тщательный анализ параметров коллизийного домена, руководствуясь моделью 2.

Расчет параметров коллизийного домена Ethernet (Модель 1)

Модель 1 дает возможность в простых случаях быстро определить, соответствует ли планируемая сеть основным требованиям стандарта Ethernet. Модель 1 устанавливает следующий набор правил, каждое из которых должно быть удовлетворено [4, 17].

1. *Повторители* требуются для объединения всех сегментов сети. (Используемые повторители должны удовлетворять требованиям спецификаций стандарта IEEE 802.3 раздел 9 и поддерживать такие функции, как восстановление формы сигнала и временных характеристик, регенерация преамбулы и др.)
2. *Трансиверы*, подключенные к повторителям по AUI интерфейсу (рис. 7.9 б), учитываются только в том случае, когда они являются частью анализируемого пути между удаленными узлами (DTE). (Трансиверы обычно нужны для подключения сегментов – толстого коаксиального кабеля Ethernet и волоконно-оптического кабеля. Витая пара и тонкий коаксиальный кабель подключаются к повторителю через встроенные MAU элементы)
3. *Путь передачи данных между любыми двумя DTE* может включать в себя до 5 сегментов, 4 повторителей (с необязательными AUI портами), 2 трансиверов (отдельными MAU устройствами) и 2 трансиверных интерфейсных кабелей (MAU элементы, встроенные в повторители, не подсчитываются).
4. *Длина трансиверного интерфейсного кабеля* не должна превышать 25 м (суммарная длина трансиверного кабеля не превосходит 50 м на один сегмент, поскольку на сегмент – оптический или на основе толстого коаксиального кабеля – требуется два трансивера).
5. Если путь передачи между DTE состоит из четырех повторителей и пяти сегментов, то *смешанных сегментов* (на основе 10Base2 и/или 10Base5) может быть не больше трех – оставшиеся два сегмента должны быть *чисто связными сегментами* ("точка-точка", т. е. на основе 10Base-T и/или 10Base-FL). Для сегментов 10Base-FL расстояние не должно превосходить 500 м.
6. Если путь передачи между DTE состоит из трех повторителей и четырех сегментов, используются следующие ограничения:
 - максимальная длина по оптическому сегменту (10Base-FL) между повторителями не должна превосходить 1000 м;
 - максимальная длина по оптическому сегменту (10Base-FL) между DTE и повторителем не должна превосходить 400 м;
 - снимается ограничение на число смешанных сегментов (все четыре сегмента могут быть смешанными, т. е. строиться на основе толстого и/или тонкого коаксиальных кабелей).

Проведем анализ конфигурации сети Ethernet, показанной на рис. 7.14.

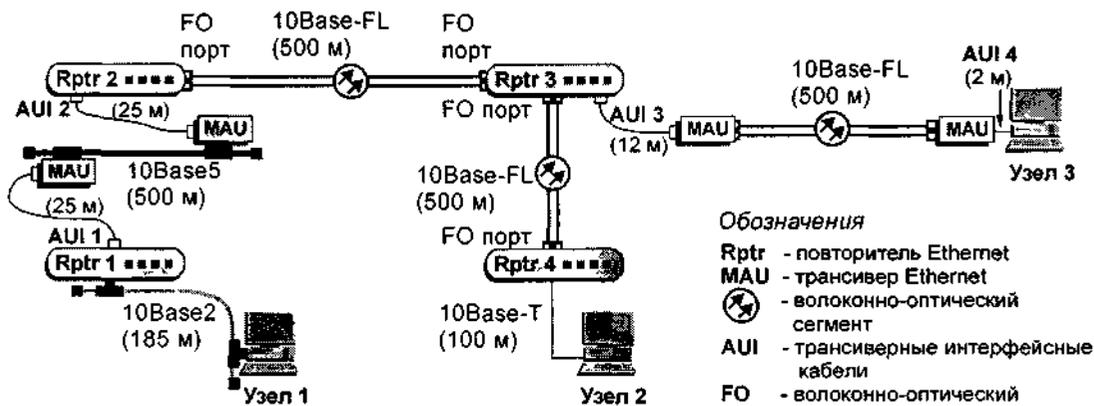


Рис. 7.14. Допустимая конфигурация сети Ethernet

Рассмотрим путь между узлами 1 и 2: число повторителей – 4, сегментов – 5, трансиверов – 2, трансиверных интерфейсных кабелей (AUI кабели) – 2, суммарная длина кабелей не превосходит 50 м, число смешанных коаксиальных сегментов 2, т.е. не превосходит 3 (остальные три сегмента – точка-точка). Таким образом, путь между узлами 1 и 2 удовлетворяет требованиям модели 1.

Однако путь между узлами 1 и 3 не удовлетворяет этим требованиям, поскольку число трансиверов на этом пути равно 4. Сами трансиверы не вносят дополнительную задержку. В этом смысле оптический порт трансивера, прикрепленного к повторителю 3 был бы такой же быстрый, как и встроенные оптические порты, если бы длина интерфейсного кабеля AUI 3 равнялась нулю). Но задержку могут вносить трансиверные интерфейсные кабели. Поэтому правильной для анализа пути между узлами 1 и 3 использовать модель 2.

Расчет параметров коллизийного домена Ethernet (Модель 2)

Нет смысла прибегать к использованию модели 2, если выполняется модель 1, поскольку сеть, удовлетворяющая требованиям модели 1, всегда будет удовлетворять требованиям модели 2. Поэтому при исследовании сложного коллизийного домена отдельные простые пути между узлами можно анализировать при помощи модели 1. Модель 2 позволяет проводить анализ более сложных конфигураций путей между удаленными узлами (DTE) коллизийного домена Ethernet [4, 18]. Два параметра вычисляются в этой модели: во-первых, задержка на двойном пробеге RTD для каждого пути в пределах коллизийного домена – она должна быть меньше 575 ВТ; во-вторых, проверяется допустимое уменьшение межкадрового интервала IFG – это уменьшение должно находиться в пределах 49 ВТ.

Расчет RTD. Путь между двумя DTE в общем случае состоит из одного начального, нескольких средних, и одного конечного сегментов. Для каждого пути на основе табл. 7.4 суммируются задержки на промежуточных сегментах. Если между DTE1 и DTE2 только один повторитель, то промежуточных сегментов не будет, и RTD определяется только суммой задержек от начального и конечного сегментов. Если интерфейсы DTE1 и DTE2 разные, то задержка RTD будет несколько отличаться в зависимости от того, с какой стороны выбран начальный сегмент. Сравнить с 575 ВТ следует наибольшее из подсчитанных значений. Задержка на сегменте длины L считается по формуле $RTD = Base + RTDM \times L$.

Ниже приводится расчет RTD по модели 2 для всех путей сети, показанной на рис. 7.14:

$$RTD(1, 2) = 30,73 + 89,8 + 4,88 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + 176,3 = 468,71 \text{ ВТ}$$

$$RTD(2, 1) = 26,55 + 89,8 + 4,88 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + 188,48 = 476,71 \text{ ВТ}$$

$$RTD(1, 3) = 30,73 + 89,8 + 4,88 + (12 - 2) \times 0,1026 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + 156,5 = 449,936 \text{ ВТ}$$

$$RTD(3, 1) = 12,25 + 89,8 + 4,88 + (12 - 2) \times 0,1026 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + 188,48 = 463,436 \text{ ВТ}$$

$$RTD(2, 3) = 26,55 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + (12 - 2) \times 0,1026 + 156,5 = 351,076 \text{ ВТ}$$

$$RTD(3, 2) = 12,25 + 2 \times 33,5 + (500 + 500) \times 0,1 + (12 - 2) \times 0,1026 + 176,3 = 356,576 \text{ ВТ}$$

Запасом надежности SF (safety margin) называется величина $575 - \max(RTD)$. При проектировании сетей Ethernet SF берут в пределах от 0 до 5 ВТ. Для сети (рис. 7.14) $SF = 575 - 477 = 98 \text{ ВТ}$. Запас в 5 ВТ соответствует длине 50 м и позволяет в непредви-

денных ситуациях после инсталляции нарастить тот или иной сегмент, или добавить окончное устройство.

Таблица 7.4. Значения RTD (BT) [18]

Тип сегмента	Максим. длина, м	Начальный сегмент		Средний сегмент		Конечный сегмент		RTDM* (BT/м)
		Base**	Max***	Base	Max	Base	Max	
10Base5	500	11,75	55,05	46,5	89,8	169,5	212,8	0,0866
10Base2	185	11,75	30,731	46,5	65,48	169,5	188,48	0,1026
10Base-T	100	15,25	26,55	42	53,3	165	176,3	0,113
10Base-FL	2000	12,25	212,25	33,5	233,5	156,5	356,5	0,1
Излишек AUI****	48	0	4,88	0	4,88	0	4,88	0,1026

* RTDM – вносимая задержка на кабельном сегменте с учетом двойного прохождения длины в 1 м.

** Base – максимальная допустимая по стандарту задержка, связанная с конечной скоростью обработки сигнала сетевым устройством (DTE и повторителем), соответствующая нулевой длине сегмента.

*** Max – задержка на сегменте при максимальной длине сегмента.

**** Излишек кабеля AUI считается по отношению к длине 2 м. Задержка на этой длине учтена в других параметрах. Если длина трансиверного кабеля меньше 2 м, то его вклад в RTD учитывается.

Пример 7.1 (рис. 7.15 а). Строится сеть Ethernet, основанная на двух повторителях, связанных между собой волоконно-оптическим сегментом. Узлы сети подключаются к повторителям по витой паре. Оценить максимальное допустимое расстояние сегмента между повторителями.

Решение. Пусть максимальная допустимая длина L . Тогда с учетом $SF = 5$ BT имеем: $RTD + SF = 26,55 + 33,5 + L \times 0,1 + 176,3 + 5 = 575$ BT. Отсюда $L = 3336$ м. Если оптический сегмент строится на основе многомодового волокна, максимальная длина будет 2000 м, которая установлена стандартом, причем ограничение вызвано характеристиками оптических приемопередатчиков. Возможна большая длина, если использовать нестандартные оптические приемопередатчики с более высоким динамическим диапазоном. Нет ограничений на длину 2000 м, если сегмент строить на основе одномодового волокна и использовать одномодовые лазерные передатчики – тогда ответ $L = 3336$ м.

Пример 7.2 (рис. 7.15 б). Условие то же, что и в примере 7.1, только в сети три последовательных повторителя, два оптических сегмента. Оценить максимальную допустимую суммарную длину оптических сегментов.

Решение. Пусть длины сегментов L_1 и L_2 . Тогда с учетом $SF = 5$ BT имеем:

$$RTD + SF = 26,55 + 33,5 + 33,5 + (L_1 + L_2) \times 0,1 + 176,3 + 5 = 575 \text{ BT. Отсюда } L_1 + L_2 = 3001 \text{ м.}$$

Пример 7.3 (рис. 7.15 в). Оценить максимальное допустимое расстояние L оптического сегмента в сети, состоящей из двух узлов (канал считать полудуплексным).

Решение. Полудуплексный канал создает коллизийный домен. Поэтому необходимо рассчитать задержку на двойном пробеге. Рассчитаем сначала задержку между узлом 1 и 2 для случаев с двумя и одним повторителями:

$$(2 \text{ повторителя}): RTD = 12,25 + 156,5 + 33,5 + L \times 0,1$$

$$(1 \text{ повторитель}): RTD = 12,25 + 156,5 + L \times 0,1$$

Сразу видно, что каждый дополнительный повторитель создает дополнительную задержку 33,5 BT. Тогда задержка при отсутствии повторителей будет на 33,5 BT меньше, чем при одном повторителе, т.е.:

$$(0 \text{ повторителей}) RTD + SF = 12,25 + 156,5 - 33,5 + L \times 0,1 + 5 = 575 \text{ BT. Отсюда } L = 4347 \text{ м.}$$

Расчет допустимого уменьшения межкадрового интервала. Межкадровый интервал IFG в 96 BT выдерживается любой станцией, которая ведет последовательную передачу кадров, или станцией, которая только собирается приступить к передаче. Благодаря наличию интервала между кадрами приемные узлы способны обрабатывать каждый проходящий кадр. Конечный межкадровый интервал также нужен для правильной работы протокола CSMA/CD. Однако интервал в 96 BT, поддерживаемый передающей станцией, не означает, что и на приемную станцию кадры будут поступать с таким же интервалом. При движении кадров по сети могут возникать меняющиеся временные задержки, связанные с ретрансляцией кадров сете-

выми компонентами. Кроме того, вариации задержки могут возникать из-за процессов реконструкции сигнала на повторителях – повторитель, восстанавливая преамбулу, добавляет в нее потерянные ранее биты. Эти задержки, аккумулируясь, способны значительно уменьшать межкадровый интервал SVV (segment variability value), что, в свою очередь, может приводить к неправильной идентификации принимаемого кадра и, в итоге, к потере кадра. Стандартом установлена величина максимального допустимого уменьшения межкадрового интервала, составляющая 49 БТ.

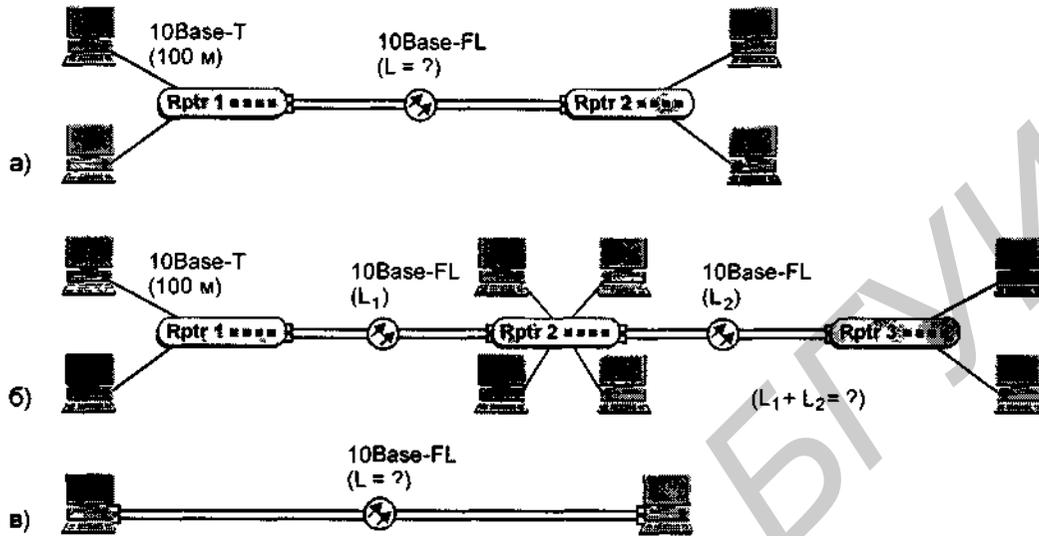


Рис. 7.15. Примеры сетей Ethernet с использованием волоконно-оптических сегментов

Поскольку уменьшение IFG происходит только на промежуточных сетевых устройствах, то последний сегмент, к которому подключен приемный узел сети, сам по себе не приводит к уменьшению IFG. Поэтому для расчета величины SVV суммируют величины допустимых уменьшений по всем предыдущим сегментам, каждый из которых замыкается повторителем. Если в сети приемный и передающий узлы подключены к разным сегментам, то следует в качестве передающего сегмента выбирать сегмент с большей величиной допустимого уменьшения IFG.

Таблица 7.5. Величины допустимых уменьшений IFG (БТ), вносящие вклад в SVV, для различных сегментов

Тип сегмента	Начальный сегмент	Средний сегмент
Коаксиальные кабели (10Base2, 10Base5)	16	11
ВОК (10Base-FL), витая пара (10Base-T)	10,5	8

Приведем расчет SVV для сети, показанной на рис. 7.14:

$$\begin{aligned}
 \text{SVV (узел 1, узел 2)} &= 16+11+8+8 = 43 \text{ БТ} \\
 \text{SVV (узел 2, узел 1)} &= 10,5+8+8+11 = 37,5 \text{ БТ} \\
 \text{SVV (узел 1, узел 3)} &= 16+11+8 = 35 \text{ БТ} \\
 \text{SVV (узел 3, узел 1)} &= 10,5+8+11 = 29,5 \text{ БТ} \\
 \text{SVV (узел 2, узел 3)} &= 10,5+8 = 18,5 \text{ БТ} \\
 \text{SVV (узел 3, узел 2)} &= 10,5+8 = 18,5 \text{ БТ}
 \end{aligned}$$

Как видно, максимальная величина SVV не превосходит 49 БТ, значит сеть удовлетворяет требованиям модели 2.

В модели 1 наибольшая задержка, равная предельной допустимой, возникает в сети, в которой имеется 5 последовательных коаксиальных сегментов: $SVW=16+11+11+11 = 49$ БТ.

Пример 7.4. Оценить максимальное допустимое число сегментов N на пути между двумя удаленными узлами коллизийного домена сети, если считать, что сегменты строятся на основе витой пары и/или оптического волокна. Оценить в этом случае допустимую длину L этого пути.

Решение. Так как средних сегментов всего $N-2$, то $SVW = 10,5+(N-2) \times 8$. Отсюда находим при $N = 6$, $SVW = 42,5$ и не превосходит 49 (при $N = 7$, $SVW = 50,5 > 49$). Ответ $N = 6$ последовательных сегментов (5 повторителей). Следует подчеркнуть, что такое число последовательных сегментов не удовлетворяет модели 1. Для оценки L заметим, что все параметры по RTD (включая задержку на распространении сигнала по кабелю) для витой пары больше, чем для оптического волокна (строки 10Base-T и 10Base-FL табл. 7.4). Поэтому оценку можно сделать для витой пары, допуская замену витой пары на волокно в любом сегменте (суммарная длина по сегментам пути может только возрасти):

$$RTD+SF = 15,25+(N-2) \times 42 + 165 + L \times 0,113 + 5 = 575 \text{ БТ.}$$

Отсюда при $N = 6$ находим $L = 1962$ м.

Хотя число последовательных повторителей в сети Ethernet, как видно из примера 7.4, не превосходит 5, полное число повторителей в коллизийном домене может быть значительно больше, например, не запрещено к центральному повторителю по витым парам подключить 10 удаленных повторителей и т.п. Однако следует всегда учитывать то, что при большом числе рабочих станций ($n > 20$) в коллизийном домене, эффективность сети начинает падать: полоса пропускания ведет себя как $1/n$ от 10 Мбит/с, а средняя полоса в расчете на одну станцию становится $1/n^2$. Поэтому в сетях с большим числом рабочих станций следует устанавливать коммутаторы в центральные узлы, создавая множество доменов.

7.4. Сети Fast Ethernet

Отметим главные особенности эволюционного развития от сетей Ethernet к сетям Fast Ethernet, стандарт IEEE 802.3u [19, 20]:

- десятикратное увеличение пропускной способности сегментов сети;
- сохранение метода случайного доступа CSMA/CD, принятого в Ethernet;
- сохранение формата кадра, принятого в Ethernet;
- поддержка традиционных сред передачи данных – витой пары и ВОК.

Указанные свойства, а также, являющаяся следствием не менее важная функция поддержки двух скоростей и автоопределения 10/100 Мбит/с, встраиваемая в сетевые карты и коммутаторы Fast Ethernet, позволяют осуществлять плавный переход от сетей Ethernet к более скоростным сетям Fast Ethernet, обеспечивая выгодную приемственность по сравнению с другими технологиями. Еще один дополнительный фактор успешного завоевания рынка – низкая стоимость оборудования Fast Ethernet.

Архитектура стандарта Fast Ethernet

На рис. 7.16 показана структура уровней Fast Ethernet. Еще на стадии разработки стандарта 100Base-T комитет IEEE 802.3u определил, что не существует универсальной схемы кодирования сигнала, которая была бы идеальной для всех трех физических интерфейсов (TX, FX, T4). Если сравнивать со стандартом Ethernet, то там функцию кодирования (манчестерский код) выполняет уровень физической сигнализации PLS (рис. 7.6), который находится выше средонезависимого интерфейса AUI. В стандарте Fast Ethernet функции кодирования выполняет подуровень кодирования PCS, размещенный ниже средонезависимого интерфейса MII. В результате этого, каждый трансивер должен использовать свой собственный набор схем кодирования, наилучшим образом подходящий для соответствующего физического интерфейса, например набор 4B/5B и NRZI для интерфейса 100Base-FX.

MII интерфейс и трансиверы Fast Ethernet. Интерфейс MII (medium independent interface) в стандарте Fast Ethernet является аналогом интерфейса AUI в стандарте Ethernet. MII интерфейс обеспечивает связь между подуровнями согласования и физического кодирования. Основное его назначение – упростить использование разных типов среды. MII интерфейс предполагает дальнейшее подключение трансивера Fast Ethernet. Для связи используется

40-контактный разъем. Максимальное расстояние по MII интерфейсу кабелю не должно превышать 0,5 м.

Если устройство имеет стандартные физические интерфейсы (например, RJ-45), то структура подуровней физического уровня может быть скрыта внутри микросхемы с большой интеграцией логики. Кроме того, допустимы отклонения в протоколах промежуточных подуровней в едином устройстве, ставящие главной целью рост быстродействия.

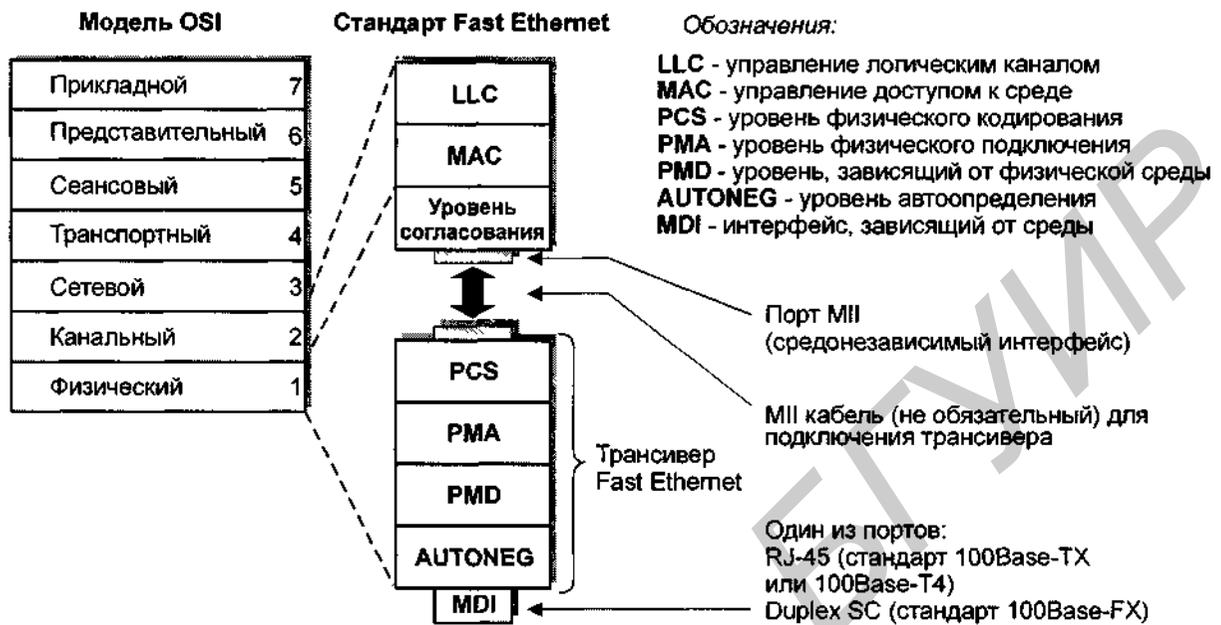


Рис. 7.16. Структура уровней стандарта Fast Ethernet, MII интерфейс и трансивер Fast Ethernet

Физические интерфейсы Fast Ethernet

Стандартом Fast Ethernet IEEE 802.3u установлены три типа физического интерфейса (рис. 7.17, табл. 7.6): 100Base-FX, 100Base-TX и 100Base-T4.

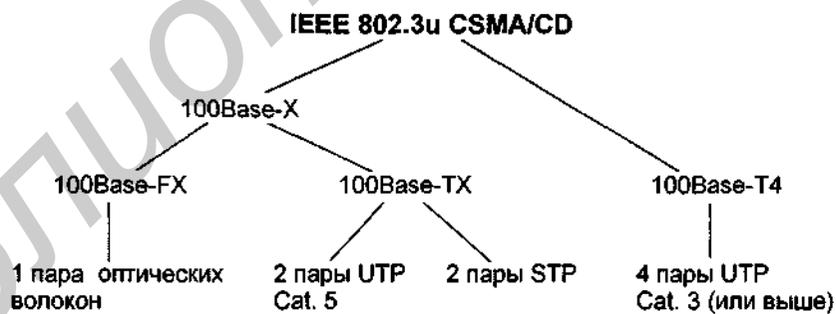


Рис. 7.17. Физические интерфейсы стандарта Fast Ethernet

100Base-FX. Стандарт этого волоконно-оптического интерфейса полностью идентичен стандарту FDDI PMD, который подробно рассмотрен в главе 6. Основным оптическим разъемом стандарта 100Base-FX является Duplex SC. Интерфейс допускает дуплексный канал связи.

Таблица 7.6. Основные характеристики физических интерфейсов стандарта Fast Ethernet IEEE 802.3u [19]

Характеристика	100Base-FX	100Base-TX	100Base-T4
Порт устройства	Duplex SC	RJ-45	RJ-45
Среда передачи	Оптическое волокно	Витая пара UTP Cat. 5	Витая пара UTP Cat. 3, 4, 5
Сигнальная схема	4В/5В	4В/5В	8В/6Т
Битовое кодирование	NRZI	MLT-3	NRZI
Число витых пар/ волокон	2 волокна	2 витых пары	4 витых пары
Протяженность сегмента	≤ 412 м (mm) ≤ 2 км (mm)* ≤ 100 км (sm)*	≤ 100 м	≤ 100 м

Обозначения: mm – многомодовое волокно, sm – одномодовое волокно

* – указанные расстояния могут быть достигнуты только при дуплексном режиме связи.

100Base-TX. Стандарт этого физического интерфейса предполагает использование неэкранированной витой пары категории не ниже 5. Он полностью идентичен стандарту FDDI UTP PMD, который также подробно рассмотрен в главе 6. Физический порт RJ-45, как и в стандарте 10Base-T, может быть двух типов: MDI (сетевые карты, рабочие станции) и MDI-X (повторители Fast Ethernet, коммутаторы). Порт MDI в единичном количестве может иметься на повторителе Fast Ethernet. Для передачи по медному кабелю используются пары 1 и 3. Пары 2 и 4 – свободны. Порт RJ-45 на сетевой карте и на коммутаторе может поддерживать, наряду с режимом 100Base-TX, и режим 10Base-T, или функцию автоопределения скорости. Большинство современных сетевых карт и коммутаторов поддерживают эту функцию по портам RJ-45 и, кроме этого, могут работать в дуплексном режиме.

100Base-T4. Этот тип интерфейса позволяет обеспечить полудуплексный канал связи по витой паре UTP Cat. 3 и выше. Именно возможность перехода предприятия со стандарта Ethernet на стандарт Fast Ethernet без радикальной замены существующей кабельной системы на основе UTP Cat. 3 следует считать главным преимуществом этого стандарта.

В отличие от стандарта 100Base-TX, где для передачи используется только две витых пары кабеля, в стандарте 100Base-T4 используются все четыре пары (рис. 7.18 а). Причем при связи рабочей станции и повторителя посредством прямого кабеля данные от рабочей станции к повторителю идут по витым парам 1, 3 и 4, а в обратном направлении – по парам 2, 3 и 4. Пары 1 и 2 используются для обнаружения коллизий подобно стандарту Ethernet. Другие две пары 3 и 4 попеременно, в зависимости от команд, могут пропускать сигнал либо в одном, либо в другом направлении. Передача сигнала параллельно по трем витым парам эквивалентна инверсному мультиплексированию, рассмотренному в главе 5. Битовая скорость в расчете на один канал составляет 33,33 Мбит/с.

Символьное кодирование 8В/6Т. Если бы использовалось манчестерское кодирование, то битовая скорость в расчете на одну витую пару была бы 33,33 Мбит/с, что превышало бы установленный предел 30 МГц для таких кабелей. Эффективное уменьшение частоты модуляции достигается, если вместо прямого (двухуровневого) бинарного кода использовать трехуровневый (ternary) код. Этот код известен как **8В/6Т** [16]; это означает, что прежде, чем происходит передача, каждый набор из 8 бинарных битов (символ) сначала преобразуется в соответствии с определенными правилами в 6 тройных (трехуровневых) символов. На примере, показанном на рис.7.18 б, можно определить скорость трехуровневого символьного сигнала: $(100 \times 6/8)/3 = 25$ МГц, значение которой не превышает установленный предел.

Интерфейс 100Base-T4 имеет один существенный недостаток – принципиальную невозможность поддержки дуплексного режима передачи. И если при строительстве небольших сетей Fast Ethernet с использованием повторителей 100Base-TX не имеет преимуществ перед 100Base-T4 (существует коллизийный домен, полоса пропускания которого не больше 100 Мбит/с), то при строительстве сетей с использованием коммутаторов недостаток интерфейса 100Base-T4 становится очевидным и очень серьезным. Поэтому данный интерфейс не получил столь большого распространения, как 100Base-TX и 100Base-FX.

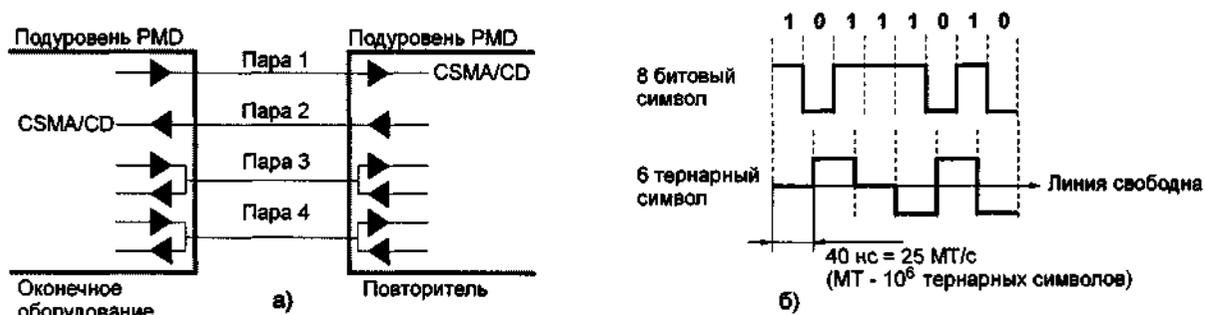


Рис. 7.18. Физические интерфейсы 100Base-T4: а) использование витых пар; б) кодирование 6В/8Т

Типы устройств Fast Ethernet

Основные категории устройств, применяемых в Fast Ethernet, такие же как и в Ethernet: трансиверы; конвертеры; сетевые карты (для установки на рабочие станции/файл серверы); повторители; коммутаторы.

Трансивер – это (по аналогии с трансивером Ethernet) двухпортовое устройство, охватывающее подуровни PCS, PMA, PMD и AUTONEG, и имеющее, с одной стороны, MII интерфейс, с другой – один из средозависимых физических интерфейсов (100Base-FX, 100Base-TX или 100Base-T4). Трансиверы используются сравнительно редко, как и редко используются сетевые карты, повторители, коммутаторы с интерфейсом MII.

Сетевая карта. Наиболее широкое распространение получили сегодня сетевые карты с интерфейсом 100Base-TX на шину PCI. Необязательными, но крайне желательными, функциями порта RJ-45 являются автоконфигурирование 100/10 Мбит/с и поддержка дуплексного режима. Большинство современных выпускаемых карт поддерживают эти функции. Выпускаются также сетевые карты с оптическим интерфейсом 100Base-FX (производители IMC, Adaptec, Transition Networks и др.) – основным стандартным оптическим является разъем SC (допускается ST) на многомодовое волокно.

Конвертер (media converter) – это двухпортовое устройство, оба порта которого представляют средозависимые интерфейсы. Конвертеры, в отличие от повторителей, могут работать в дуплексном режиме за исключением случая, когда имеется порт 100Base-T4. Распространены конвертеры 100Base-TX/100Base-FX. В силу общих тенденций роста широкополосных протяженных сетей с использованием одномодовых ВОК потребление оптических приемопередатчиков на одномодовое волокно резко возросло в последние один-два года. Конвертерные шасси, объединяющие несколько отдельных модулей 100Base-TX/100Base-FX, позволяют подключать множество сходящихся в центральном узле волоконно-оптических сегментов к коммутатору, оснащенный дуплексными портами RJ-45 (100Base-TX).

Повторитель. По параметру максимальных временных задержек при ретрансляции кадров повторители Fast Ethernet подразделяются на два класса:

- Класс I. Задержка на двойном пробеге RTD не должна превышать 130 нс. В силу менее жестких требований, повторители этого класса могут иметь порты T4 и TX/FX, а также объединяться в стек.
- Класс II. К повторителям этого класса предъявляются более жесткие требования по задержке на двойном пробеге: RTD < 92 нс, если порты типа TX/FX; и RTD < 67 нс, если все порты типа T4. (В силу значительных отличий в организации физических уровней возникает большая задержка кадра при ретрансляции между портами интерфейсов T4 и TX/FX. Поэтому повторители, совмещающие в пределах одного устройства порты T4 с портами TX/FX, отнесены по стандарту к классу I.)

Коммутатор – одно из наиболее важных устройств при построении корпоративных сетей. Большинство современных коммутаторов Fast Ethernet поддерживают автоконфигурирование 100/10 Мбит/с по портам RJ-45 и могут обеспечивать дуплексный канал связи по всем портам (за исключением 100Base-T4). Коммутаторы могут иметь специальные дополнительные слоты для установления up-link модуля. В качестве интерфейсов у таких модулей могут выступать оптические порты типа Fast Ethernet 100Base-FX, FDDI, ATM (155 Мбит/с), Gigabit

Ethernet и др. Крупными производителями коммутаторов Fast Ethernet являются компании: 3Com, Bay Networks, Cabletron, DEC, Intel, NBase, Cisco и др.

7.5. Проектирование сети в пределах коллизийного домена Fast Ethernet

Для анализа коллизийного домена в стандарте Fast Ethernet приняты две модели (схожие назначению со стандартом Ethernet). Модель 1 устанавливает жесткие правила, при помощи которых можно анализировать конфигурацию сети. Как и в стандарте Ethernet, эти правила являются достаточными, то есть, если конфигурация сети удовлетворяет этим правилам, то сеть построена верно. Если же конфигурация коллизийного домена не удовлетворяет правилам модели 1, то для анализа следует прибегать к модели 2. Разумеется, любая конфигурация, удовлетворяющая модели 1, будет удовлетворять модели 2.

Модель 1

Основные допустимые конфигурации модели 1 показаны на рис. 7.19 [21]. Расстояния сегментов на витой паре указаны максимальные – в рамках модели 1 их нельзя превышать. Например, расстояние между двумя повторителями (модель 1D) не должно превышать 5 м. Исходя из этих условий, даются максимальные значения волоконно-оптических сегментов, гарантированные для этой модели (табл. 7.7).

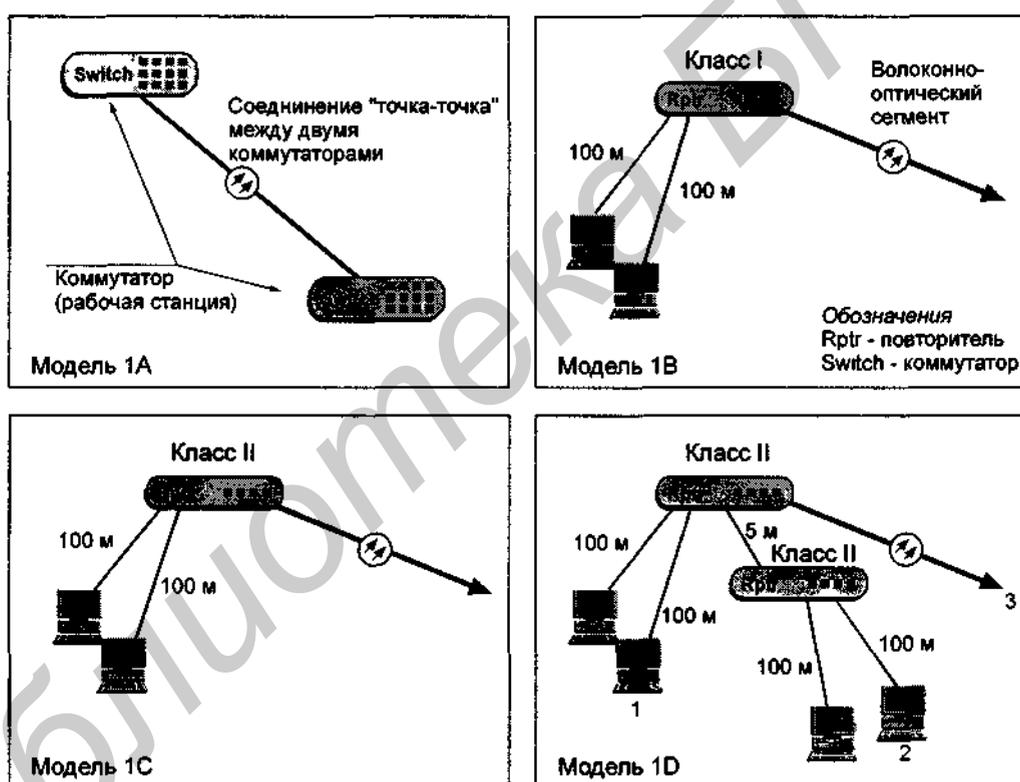


Рис. 7.19. Модели 1А, 1В, 1С, 1D: основные конфигурации расчета коллизийного домена

Простейшая топология (1А) определяет только один сегмент "точка-точка", между двумя узлами. В качестве устройства на каждом узле может выступать как оконечное оборудование данных (рабочая станция, файл-сервер), так и коммутатор. Если узлы не поддерживают дуплексный режим передачи, то максимальное расстояние между ними 412 м. Если узлы поддерживают дуплексный режим, то ввиду отсутствия коллизийного домена, единственными факторами, ограничивающими расстояние, становятся дисперсионные характеристики волокна,

его тип, а также технические характеристики приемопередатчиков (мощность, спектральное уширение передатчика, чувствительность приемника).

Таблица 7.7. Модели 1A, 1B, 1C, 1D: длины оптических сегментов [22]

Топология	Характеристики	Максимальная длина оптического сегмента
Модель 1A	FX	412 м
	FX, дуплекс, многомодовое волокно	2000 м
	FX, дуплекс, одномодовое волокно	110 км*
Модель 1B	Только TX/FX	160 м
	Если UTP сегменты – только T4	131 м
Модель 1C	Только TX/FX	208 м
Модель 1D	Только TX/FX	111 м

Обозначения: FX – 100Base-FX, TX – 100Base-TX, T4 – 100Base-T4, * оборудование NBase.

Остальные модели отражают конфигурации с повторителями: модель 1B – один повторитель класса I (больше одного повторителя класса I по модели 1 подключать нельзя), модели 1C и 1D – повторители класса II. Подключение коммутатора вместо оконечного оборудования не меняет параметров, поскольку остается коллизийный домен.

Модель 2

Модель основывается на строгом расчете величины RTD для различных пар удаленных устройств. В стандарте Fast Ethernet время RTD не должно превосходить **512 БТ**. Эта цифра отличается от аналогичного параметра в стандарте Ethernet (575 БТ), но отличие не более чем формальное, поскольку уменьшение максимальной задержки на преамбулу в Fast Ethernet сопровождается пересчетом параметров задержки на DTE, которые тоже уменьшены на время передачи преамбулы.

В силу синхронности режима передачи кадров, а также из-за небольшого числа повторителей в пределах коллизийного домена в Fast Ethernet отсутствует проблема, связанная с уменьшением величины межкадрового интервала (свойственная сетям Ethernet).

Полное время RTD пути между двумя удаленными узлами вычисляется на основе суммы задержек RTD на промежуточных устройствах, на оконечных устройствах и на кабельных сегментах. В табл. 7.8 приведены принятые стандартом Fast Ethernet допустимые задержки для разных типов устройств. Если используется подключение трансивера, то вплоть до максимальной длины интерфейсного MII кабеля 0,5 м вносимая задержка от него не учитывается и включена в параметры задержки DTE.

С учетом длин сегментов (табл. 7.7) и максимальных допустимых задержек (табл. 7.8) проверим на предмет удовлетворения модели 2 конфигураций А, В, С и D модели 1 (рис. 7.19).

1A:	$RTD = 100 + 412 \times 1,0 = 512 \text{ БТ}$	FX, полудуплексный режим связи
1B:	$RTD = 100 + 100 \times 1,112 + 140 + 160 \times 1,0 = 511,2 \text{ БТ}$	Только TX/FX
1B:	$RTD = 127 + 100 \times 1,112 + 140 + 131 \times 1,0 = 509,2 \text{ БТ}$	UTP сегменты только на основе T4
1C:	$RTD = 100 + 100 \times 1,112 + 92 + 208 \times 1,0 = 511,2 \text{ БТ}$	Только TX/FX
1D:	$RTD = 100 + 205 \times 1,112 + 2 \times 92 = 511,96 \text{ БТ}$	Только TX/FX (между 1 и 2)
1D:	$RTD = 100 + 105 \times 1,112 + 2 \times 92 + 111 \times 1,0 = 511,76 \text{ БТ}$	Только TX/FX (между 2 и 3).

Во всех случаях RTD не превосходит 512 БТ, таким образом конфигурации удовлетворяют модели 2.

Приведем несколько примеров расчета коллизийных доменов Fast Ethernet по модели 2 (рис. 7.20). В примерах 7.5-7.7 предполагается, что длина всех подключений по витой паре не превосходит 10 м. В примере 7.8 в одном коллизийном домене совмещены два различных типа физического интерфейса: 100Base-TX и 100Base-T4.

Таблица 7.8. Максимальные допустимые задержки RTD на устройствах Fast Ethernet и на кабельных сегментах, установленные стандартом [21]

Устройство/кабельный сегмент	Максимальная задержка на двойном пробеге RTD, (BT)*
DTE / коммутатор (любая комбинация TX и/или FX)	100**
DTE / коммутатор (оба устройства T4)	138**
DTE / коммутатор (комбинация T4 с TX или FX)	127**
Повторитель класса I	140
Повторитель класса II (с портами TX/FX)	92
Повторитель класса II (с портами T4)	67
Конвертер класса I (TX/FX порты)	130
Конвертер класса II (TX/FX порты)	92
Витая пара UTP Cat. 3***, 1 м	1,14
Витая пара UTP Cat. 4***, 1 м	1,14
Витая пара UTP Cat. 5, 1 м	1,112
Оптическое волокно, 1 м	1,0

- * Это максимальное допустимое по стандарту значение задержки в UTP Cat 5. Производители могут выпускать витую пару с меньшим значением этого параметра
- ** Учитываются сразу оба оконечных устройства
- *** Может использоваться только с интерфейсами 100Base-T4

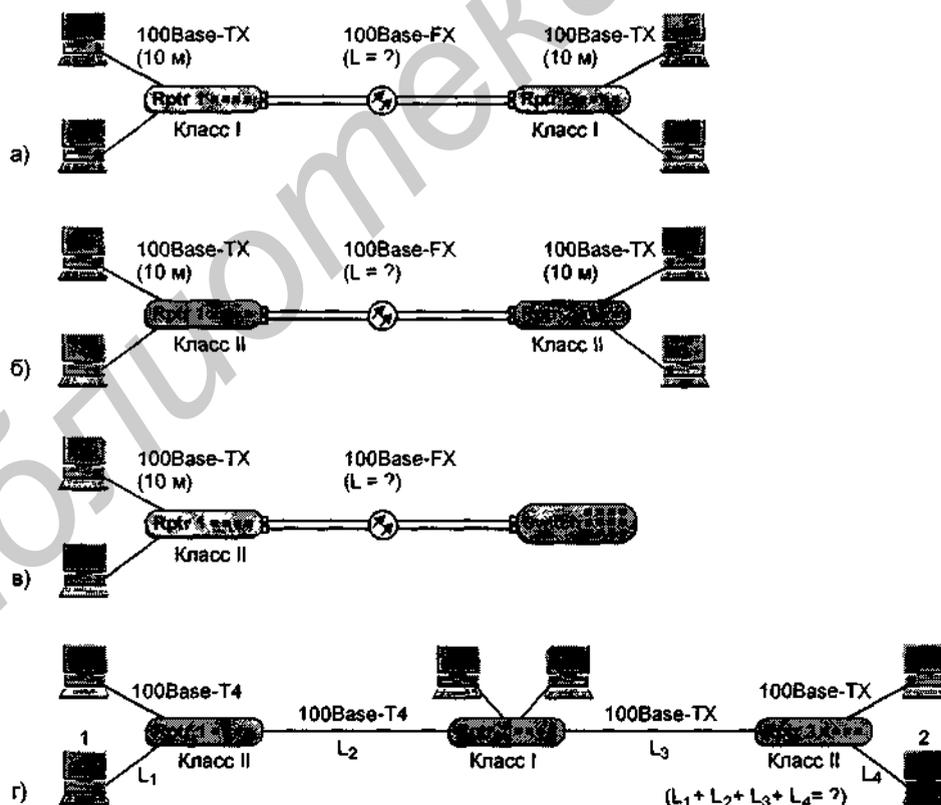


Рис. 7.20. Примеры топологий сетей Fast Ethernet в рамках коллизийного домена

Пример 7.5. Оценить максимальную длину оптического сегмента между повторителями класса I (TX/FX), если длины всех сегментов по витой паре не превосходят 10 м, (рис. 7.20 а).

Решение. На основании табл. 7.8 находим:

$$RTD = 100 + 20 \times 1,112 + 2 \times 140 + L \times 1,0 = 512 \text{ ВТ. Отсюда } L = 109,76 \text{ м.}$$

Пример 7.6. Оценить максимальную длину оптического сегмента между повторителями класса II (TX/FX), если длины всех сегментов по витой паре не превосходят 10 м, (рис. 7.20 б).

Решение. $RTD = 100 + 20 \times 1,112 + 2 \times 92 + L \times 1,0 = 512 \text{ ВТ. Отсюда } L = 205,76 \text{ м.}$

Пример 7.7. Оценить максимальную длину оптического сегмента между повторителем класса II (TX/FX) и коммутатором, если длины всех сегментов по витой паре не превосходят 10 м, (рис. 7.20 в).

Решение. $RTD = 100 + 10 \times 1,112 + 92 + L \times 1,0 = 512 \text{ ВТ. Отсюда } L = 308,88 \text{ м.}$

Пример 7.8. Оценить максимальную суммарную длину сегментов по витой паре между устройствами 1 и 2 в конфигурации, показанной на рис. 7.20 г.

Решение. $RTD = 127 + (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \times 1,112 + 67 + 140 + 92 = 512 \text{ ВТ. Отсюда } L = 77,33 \text{ м.}$

Приведенные оценки выполнены без запаса. Однако желательно, рассчитывая конфигурации коллизионных доменов Fast Ethernet, делать запас $SM = 5 \text{ ВТ}$, что соответствует длине 5 м, т.е. в 10 раз меньше, чем в стандарте Ethernet – 50 м.

7.6. Дуплексный Ethernet

Дуплексный канал связи (также используется термин полнодуплексный канал связи) в отличие от полудуплексного позволяет вести передачу в двух направлениях одновременно. Необходимым условием дуплексной передачи является поддержка дуплексной связи на физическом уровне. Два основных типа среды – оптическое волокно и витая пара (за исключением интерфейса 100Base-T4) – поддерживают дуплексную связь. Соответствующая логическая топология должна быть "точка-точка". Наличие дуплексной среды – не достаточное условие дуплексного канала. Повторитель Ethernet, имеющий внутри себя логическую топологию "шина", в принципе не может поддерживать дуплексный режим, даже если рабочие станции подключены по витой паре. В такой ситуации одновременная передача двух сигналов по одному сегменту приведет к коллизии, обнаруженной на уровне MAC.

Дуплексный канал связи может устанавливаться между оконечным устройством (рабочей станцией/сервером) и коммутатором или между двумя коммутаторами. В редких случаях используется соединение двух оконечных устройств с дуплексной передачей. Порты соответствующих устройств и коммутаторов должны поддерживать дуплексный режим. При дуплексном режиме станция или коммутатор может передавать и принимать данные одновременно. Фактически на уровне MAC параллельно функционируют два устройства – приемный и передающий модули, которые также в дуплексном режиме взаимодействуют с более высокими уровнями. При дуплексной передаче отпадает необходимость в поддержке механизма CSMA/CD, что делает алгоритм передачи значительно проще (рис. 7.21). Приемный модуль работает без изменений (рис. 7.4 б). Отсутствие специальных дополнительных требований к дуплексной передаче, более того, упрощение уровня MAC, привело к тому, что многие фирмы начали поставлять (с 1995 года) коммутаторы и сетевые карты, поддерживающие дуплексный режим передачи, которые показывали хорошую совместимость при работе друг с другом. Стандартизация дуплексного Ethernet произошла позже, в 1997 году, формально, как часть спецификаций стандарта IEEE 802.3х – контроль потока, основанный на кадрах [23]. Главное преимущество дуплексного канала – отсутствие коллизий. Дальнейшие преимущества, вытекающие из этого показателя:

1. При дуплексном режиме работы станция (коммутатор) не ждет прекращения принимаемого сигнала, а только выдерживает IFG, равный 96 ВТ, между последовательными передачами кадров, таким образом сокращаются задержки при передаче.
2. Эффективная полоса пропускания удваивается и составляет 20 Мбит/с для Ethernet.
3. Из-за отсутствия коллизий остается очень высокой производительность сети при большой загрузке (до 98%) по каждому из каналов.
4. Снимаются ограничения на длину сегментов между узлами сети, например, оптический сегмент на одномодовом волокне между двумя коммутаторами может иметь длину до

100 км, хотя при наличии оптических усилителей расстояния могут иметь глобальный масштаб.

5. Дуплексная связь обеспечивает лучшую работу приложений, критичных к задержкам (среди которых: мультимедийная связь, видеоконференции, и т.д.).

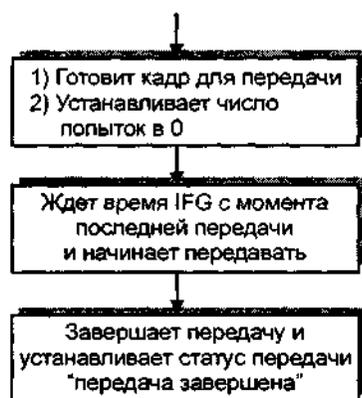


Рис. 7.21. Структурная схема дуплексного алгоритма передачи (уровень MAC)

Большинство современных коммутаторов и сетевых карт Ethernet/Fast Ethernet с дуплексными интерфейсами 10Base-T и 10Base-FL, а также 100Base-TX и 100Base-FX поддерживают дуплексный режим связи. Интерфейсы AUI и MII сетевых устройств (коммутаторов, сетевых карт) дуплексные по природе, но реально дуплексная передача по ним возможна, только если имеется поддержка на уровне MAC. Это следует учитывать при построении протяженных волоконно-оптических сегментов с использованием трансиверов Ethernet/Fast Ethernet.

7.7. Сети Gigabit Ethernet (стандарты IEEE 802.3z и 802.3ab)

В марте 1996 года комитет IEEE 802.3 одобрил проект стандартизации Gigabit Ethernet 802.3z. В мае 1996 года 11 компаний (3Com, Bay Networks, Cisco, Compaq, Granite, Intel, LSI Logic, Packet Engines, Sun, UB Networks и VLSI Technology) организовали альянс Gigabit Ethernet Alliance – GEA [24].

Альянс, объединяя усилия большого числа ведущих производителей сетевого оборудования для выработки единого стандарта и выпуска совместимых продуктов Gigabit Ethernet, преследует следующие цели:

- поддержка расширения технологий Ethernet и Fast Ethernet в ответ на потребность большей полосы пропускания;
- разработка технических предложений с целью включения в стандарт;
- выработка процедур и методов тестирования продуктов различных поставщиков.

В настоящее время в альянс GEA входят более 100 компаний. Он обеспечивает связь между техническим комитетом по стандартизации IEEE 802.3 и производителями сетевого оборудования. Альянс увеличивает эффективность работы комитета и способствует более быстрому одобрению спецификаций стандарта 802.3z [25].

Архитектура стандарта Gigabit Ethernet

На рис. 7.22 показана структура уровней Gigabit Ethernet. Как и в стандарте Fast Ethernet, в Gigabit Ethernet не существует универсальной схемы кодирования сигнала, которая была бы идеальной для всех физических интерфейсов – так, с одной стороны, для стандартов 1000Base-LX/SX/CX используется кодирование 8B/10B [26], а, с другой стороны, для стандарта 1000Base-T используется специальный расширенный линейный код TX/T2 [27]. Функцию кодирования выполняет подуровень кодирования PCS, размещенный ниже среднезависимого интерфейса GMII (gigabit media independent interface).

GMII интерфейс обеспечивает взаимодействие между уровнем MAC и физическим уровнем, является расширением интерфейса MII и может поддерживать скорости 10, 100 и 1000 Мбит/с. Он имеет отдельные 8-разрядные приемник и передатчик и может поддержи-

вать как полудуплексный, так и дуплексный режимы. Кроме этого, GMII интерфейс несет один сигнал, обеспечивающий синхронизацию, и два сигнала состояния линии – первый указывает наличие несущей, а второй – отсутствие коллизий, и еще несколько других сигнальных линий и питание. Трансиверный модуль, охватывающий физический уровень и обеспечивающий один из физических средозависимых интерфейсов, может подключаться, например, к коммутатору Gigabit Ethernet посредством GMII интерфейса.

Подуровень физического кодирования PCS. При подключении интерфейсов группы 1000Base-X подуровень PCS использует блочное избыточное кодирование 8B/10B, заимствованное из стандарта ANSI X3T11 Fibre Channel. Аналогично рассмотренному стандарту FDDI, только на основе более сложной кодовой таблицы, каждые 8 входных битов, предназначенных для передачи на удаленный узел, преобразовываются в 10-битные символы. Кроме этого, в выходном последовательном потоке присутствуют специальные контрольные 10-битные символы, например, используемые для расширения носителя (дополняют кадр Gigabit Ethernet до его минимально размера 512 байт).

При подключении интерфейса 1000Base-T подуровень PCS осуществляет специальное помехоустойчивое кодирование для обеспечения передачи по витой паре UTP Cat.5 на расстояние до 100 м – линейный код TX/T2, разработанный компанией Level One Communications [28, 29].

Два сигнала состояния линии – наличие несущей и отсутствие коллизий – генерируются этим подуровнем.

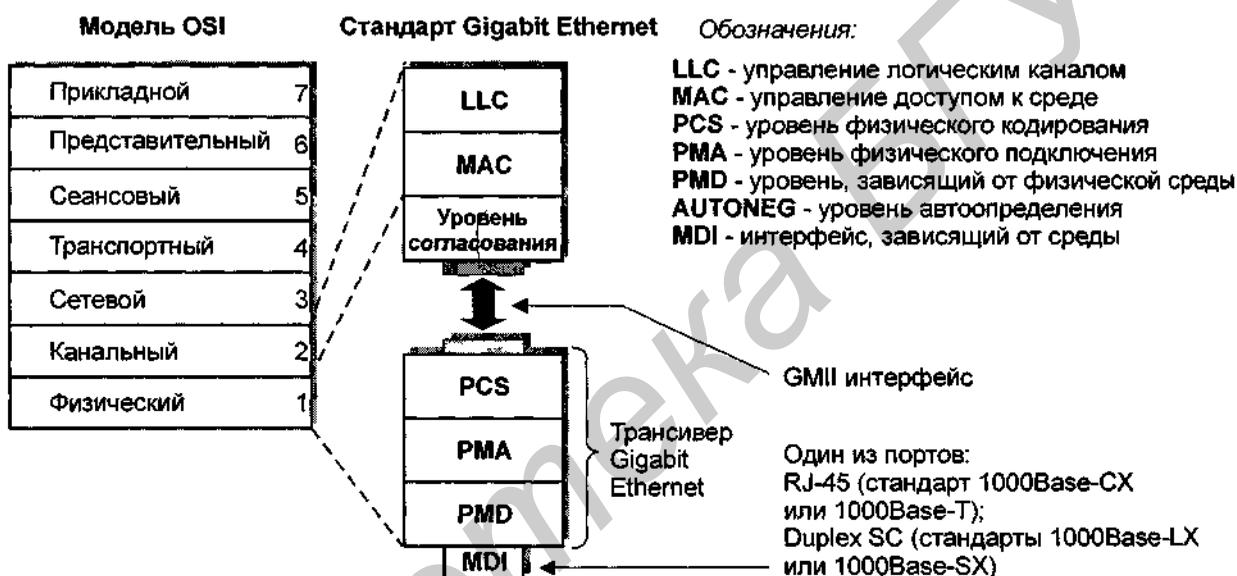


Рис. 7.22. Структура уровней стандарта Gigabit Ethernet, GMII интерфейс и трансивер Gigabit Ethernet

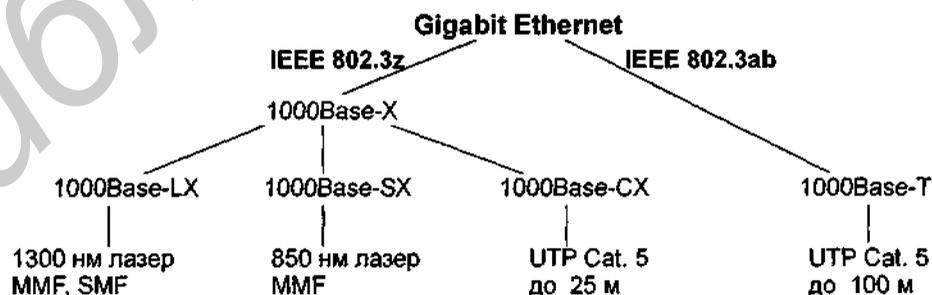


Рис. 7.23. Физические интерфейсы стандарта Gigabit Ethernet

Подуровни PMA и PMD. Физический уровень Gigabit Ethernet использует несколько интерфейсов, включая традиционную витую пару категории 5, а также многомодовое и одномодовое волокна.

Подуровень PMA преобразует параллельный поток символов от PCS в последовательный поток, а также выполняет обратное преобразование (распараллеливание) входящего последовательного потока от PMD.

Подуровень PMD определяет оптические/электрические характеристики физических сигналов для разных сред. Всего определяются 4 различных типа физических интерфейсов среды, которые отражены в спецификациях стандарта 802.3z (1000Base-X) и 802.3ab (1000Base-T), (рис. 7.23).

1000Base-X. 1000Base-X основывается на стандарте физического уровня Fibre Channel – технологии взаимодействия рабочих станций, суперкомпьютеров, устройств хранения и периферийных узлов. Fibre Channel имеет 4-уровневую архитектуру. Два нижних уровня FC-0 (интерфейсы и среда) и FC-1 (кодирование/декодирование) перенесены в Gigabit Ethernet. Поскольку Fibre Channel является одобренной технологией, то такое перенесение значительно сократило время на разработку оригинального стандарта Gigabit Ethernet.

Блочный код 8В/10В аналогичен коду 4В/5В, принятому в стандарте FDDI. Однако код 4В/5В был отвергнут в Fibre Channel, потому что этот код не обеспечивает баланса по постоянному току³. Отсутствие баланса потенциально может привести к зависящему от передаваемых данных нагреванию лазерных диодов, поскольку передатчик может передавать больше битов 1 (излучение есть), чем 0 (излучения нет), что может быть причиной дополнительных ошибок при высоких скоростях передачи.

1000Base-X подразделяется на три физических интерфейса, основные характеристики которых приведены ниже [30]:

- 1000Base-SX – определяет лазеры с допустимой длиной излучения в пределах диапазона 770-860 нм, мощность излучения передатчика в пределах от -10 до 0 дБм, при отношении ON/OFF (сигнал / нет сигнала) не меньше 9 дБ. Чувствительность приемника – 17 дБм, насыщение приемника 0 дБм;
- 1000Base-LX – определяет лазеры с допустимой длиной излучения в пределах диапазона 1270-1355 нм, мощность излучения передатчика в пределах от -13,5 до -3 дБм, при отношении ON/OFF (есть сигнал / нет сигнала) не меньше 9 дБ. Чувствительность приемника -19 дБм, насыщение приемника -3 дБм;
- 1000Base-CX – экранированная витая пара (STP "twiпax") на короткие расстояния.

Для справки в табл. 7.9 приведены основные характеристики оптических приемопередатчиков модулей, выпускаемых фирмой Hewlett Packard для стандартных интерфейсов 1000Base-SX (модель HFBR-5305, $\lambda = 850$) и 1000Base-LX (модель HFCT-5305, $\lambda = 1300$).

Таблица 7.9. Характеристики оптических приемопередатчиков Gigabit Ethernet [31]

Параметры	1000Base-SX $\lambda = 850$		1000Base-LX $\lambda = 1300$	
	min	max	min	max
Температура окружающей среды, °C	0	70	0	70
Напряжение питания, В	4,75	5,25	4,75	5,25
Выходная оптическая мощность, дБм	-10	-4	-13	-3
Чувствительность приемника, дБм	0	-17	-3	-20
Соотношение сигнал/нет сигнала, дБ	9	-	9	-
Спектральное уширение, нм	-	0,85	-	4
Время нарастания/спада оптического сигнала, нс	-	0,26	-	0,45

³ Хотя сам код 4В/5В не обеспечивает баланса по постоянному току, в стандарте FDDI предусмотрен специальный дополнительный узел, поддерживающий баланс по постоянному току с дрейфом в пределах $\pm 10\%$. При использовании кода 8В/10В необходимость в таком узле отпадает, и при этом полностью отсутствует дрейф постоянной составляющей.

Таблица 7.10. Типы кабелей и расстояния

Стандарт	Тип волокна/медного кабеля	Полоса пропускания (не хуже), МГц×км	Максимальное расстояние*, м
1000Base-LX (лазерный диод 1300 нм)	Одномодовое волокно (9 мкм)	–	5000 **
	Многомодовое волокно (50 мкм)***	500	550
	Многомодовое волокно (62,5 мкм)***	320	400
1000Base-SX (лазерный диод 850 нм)	Многомодовое волокно (50 мкм)	400	500
	Многомодовое волокно (62,5 мкм)	200	275
	Многомодовое волокно (62,5 мкм)	160	220
1000Base-CX	Экранированная витая пара: STP 150 Ом	–	25

- * Все расстояния, за исключением последнего (25 м), предполагают использование дуплексного режима
 ** Большое расстояние может обеспечивать оборудование некоторых производителей, оптические сегменты без промежуточных ретрансляторов/усилителей могут достигать 100 км.
 *** Может требоваться специальный переходной шнур (см. ниже – Особенности использования многомодовых ВОК)

При кодировании 8В/10В битовая скорость в оптической линии составляет 1250 бит/с. Это означает, что полоса пропускания участка кабеля допустимой длины должна превышать 625 МГц. Из табл. 7.10 видно, что этот критерий для строчек 2-6 выполняется. Из-за большой скорости передачи Gigabit Ethernet следует быть внимательным при построении протяженных сегментов. Безусловно, предпочтение отдается одномодовому волокну. При этом характеристики оптических приемопередатчиков могут быть значительно выше. Например, компания NBase выпускает коммутаторы с портами Gigabit Ethernet, обеспечивающими расстояния до 40 км по одномодовому волокну без ретрансляции – используются узкоспектральные DFB-лазеры, работающие на длине волны 1550 нм [32].

Особенности использования многомодовых ВОК

В мире существует огромное количество корпоративных сетей на основе многомодового ВОК с волокнами 62,5/125 и 50/125. Поэтому естественно, что еще на этапе формирования стандарта Gigabit Ethernet возникла задача адаптации этой технологии для использования в существующих многомодовых кабельных системах. В ходе исследований по разработке спецификаций 1000Base-SX и 1000Base-LX выявлена одна очень интересная аномалия, связанная с использованием лазерных передатчиков совместно с многомодовым волокном.

Многомодовое волокно конструировалось для совместного использования со светоизлучающими диодами (спектр излучения 30-50 нс). некогерентное излучение от таких светодиодов попадает в волокно по всей площади светонесущей сердцевины. В результате в волокне возбуждается огромное число модовых групп. Распространяющийся сигнал хорошо поддается описанию на языке межмодовой дисперсии. Эффективность использования таких светодиодов в качестве передатчиков в стандарте Gigabit Ethernet низкая в силу очень высокой частоты модуляции – скорость битового потока в оптической линии равна 1250 Мбод, а длительность одного импульса – 0,8 нс. Максимальная скорость, когда еще используются светодиоды для передачи сигнала по многомодовому волокну, составляет 622,08 Мбит/с (STM-4, с учетом избыточности кода 8В/10В, битовая скорость в оптической линии 777,6 Мбод).

Поэтому Gigabit Ethernet стал первым стандартом, регламентирующим использование лазерных оптических передатчиков совместно с многомодовым волокном. Площадь ввода излучения в волокно от лазера значительно меньше, чем размер сердцевины многомодового волокна. Этот факт сам по себе еще не приводит к проблеме. В то же время в технологическом процессе производства стандартных коммерческих многомодовых волокон допускается наличие некоторых некритичных при традиционном использовании волокна дефектов (отклонений в пределах допустимого), в наибольшей степени сосредоточенных вблизи оси сердцевины волокна. Хотя такое многомодовое волокно полностью удовлетворяет требованиям стандарта, когерентный свет от лазера, введенный по центру такого волокна, проходя через области неоднородности показателя преломления, способен расщепиться на небольшое число мод, которые затем распространяются по волокну разными оптическими путями и с разной скоростью. Это явление известно как *дифференциальная модовая задержка DMD*. В резуль-

тате появляется фазовый сдвиг между модами, приводящий к нежелательной интерференции на приемной стороне и к значительному росту числа ошибок (рис. 7.24 а). Этот эффект проявляется только при одновременном стечении ряда обстоятельств: менее удачное волокно, менее удачный лазерный передатчик (разумеется, удовлетворяющие стандарту) и менее удачный ввод излучения в волокно. С физической стороны эффект DMD связан с тем, что энергия от когерентного источника распределяется внутри небольшого числа мод, в то время как некогерентный источник равномерно возбуждает огромное число мод. Исследования показывают, что эффект проявляется сильнее при использовании длинноволновых лазеров (окно прозрачности 1300 нм) [33, 34].

Указанная аномалия в худшем случае может вести к уменьшению максимальной длины сегмента на основе многомодового ВОК. Поскольку стандарт должен обеспечивать 100-процентную гарантию работы, максимальная длина сегмента должна регламентироваться с учетом возможного проявления эффекта DMD.

Интерфейс 1000Base-LX. Для того, чтобы сохранить большее расстояние и избежать непредсказуемости поведения канала Gigabit Ethernet из-за аномалии, предложено вводить излучение не в центральную часть сердцевины многомодового волокна. Излучение из-за апертурного расхождения успевает равномерно распределиться по всей сердцевине волокна, сильно ослабляя проявление эффекта, хотя максимальная длина сегмента и после этого остается ограниченной (табл. 7.10). Специально разработаны переходные одномодовые оптические шнуры MCP (mode conditioning patch-cords), у которых один из соединителей (а именно тот, который планируется сопрягать с многомодовым волокном) имеет небольшое смещение от оси сердцевины волокна. Оптический шнур, у которого один соединитель – Duplex SC со смещенной сердцевинной, а другой – обычный Duplex SC, может называться так: MCP Duplex SC-Duplex SC. Разумеется, такой шнур не подходит для использования в традиционных сетях, например в Fast Ethernet, из-за больших вносимых потерь на стыке с MCP Duplex SC. Переходной шнур MCP может быть комбинированным на основе одномодового и многомодового волокон и содержать элемент смещения между волокнами внутри себя. Тогда одномодовым концом он подключается к лазерному передатчику. Что же касается приемника, то к нему может подключаться стандартный многомодовый соединительный шнур. Использование переходных MCP шнуров позволяет заводить излучение в многомодовое волокно через область, смещенную на 10-15 мкм от оси (рис. 7.24 б) [35, 36]. Таким образом, сохраняется возможность использования интерфейсных портов 1000Base-LX и с одномодовыми ВОК, поскольку там ввод излучения будет осуществляться строго по центру сердцевины волокна.

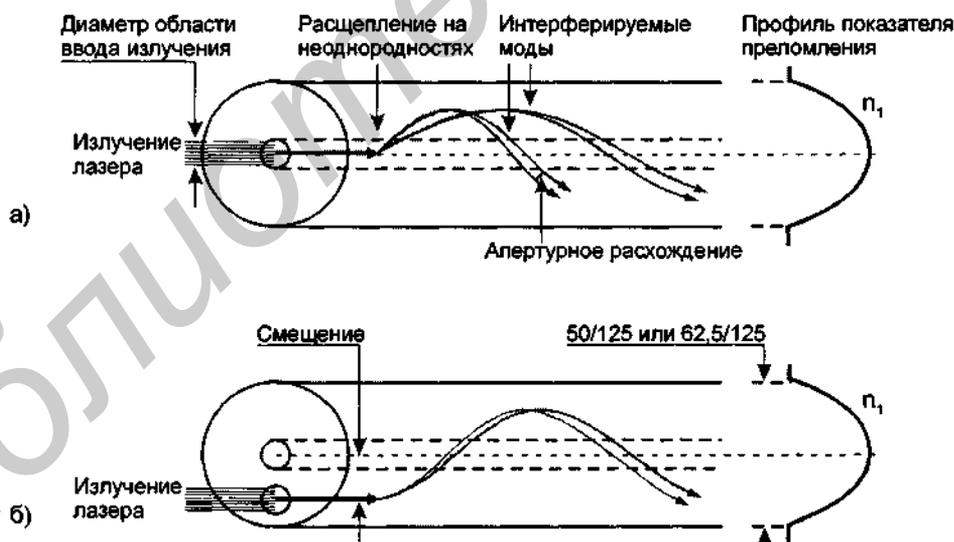


Рис. 7.24. Распространение когерентного излучения в многомодовом волокне:
 а) проявление эффекта дифференциальной модовой задержки (DMD) при осевом вводе излучения;
 б) неосевой ввод когерентного излучения в многомодовое волокно

Интерфейс 1000Base-SX. Так как интерфейс 1000Base-SX стандартизован только для использования с многомодовым волокном, то смещение области ввода излучения от центральной оси волокна можно реализовать внутри самого устройства, и тем самым снять необходимость использования согласующего оптического шнура.

1000Base-T – это стандарт Gigabit Ethernet передачи по неэкранированной витой паре категории 5 и выше на расстояния до 100 метров. Для передачи используются все четыре пары медного кабеля, скорость передачи по одной паре 250 Мбит/с. Предполагается, что стандарт будет обеспечивать дуплексную передачу, причем данные по каждой паре будут передаваться одновременно сразу в двух направлениях – двойной дуплекс (dual duplex) 1000Base-T. Технически реализовать дуплексную передачу 1 Гбит/с по витой паре UTP cat.5 оказалось довольно сложно, значительно сложнее, чем в стандарте 100Base-TX. Влияние ближних и дальних переходных помех от трех соседних витых пар на данную пару в четырехпарном кабеле требует разработки специальной скремблированной помехоустойчивой передачи, интеллектуального узла распознавания и восстановления сигнала на приеме. Несколько методов кодирования рассматриваются в качестве кандидатов на утверждение в стандарте 1000Base-T, среди которых: 5-уровневое импульсно-амплитудное кодирование PAM-5; квадратурная амплитудная модуляция QAM-25, и др. [37]. Ниже приведены кратко идеи PAM-5.

Почему 5-уровневое кодирование? Распространенное 4-уровневое кодирование обрабатывает входящие биты парами. Всего существует 4 различных комбинации – 00, 01, 10, 11. Передатчик может каждой паре бит установить свой уровень напряжения передаваемого сигнала, что уменьшает в 2 раза частоту модуляции 4-уровневого сигнала, 125 МГц вместо 250 МГц, (рис. 7.25), и, следовательно, частоту излучения. Пятый уровень добавлен для создания избыточности кода. В результате чего становится возможной коррекция ошибок на приеме. Это дает дополнительный резерв 6 дБ в соотношении сигнал/шум.

Для разработки спецификаций этого стандарта создано отдельное подразделение P802.3ab. Ожидаемый срок появления этого стандарта – начало 1999 года.

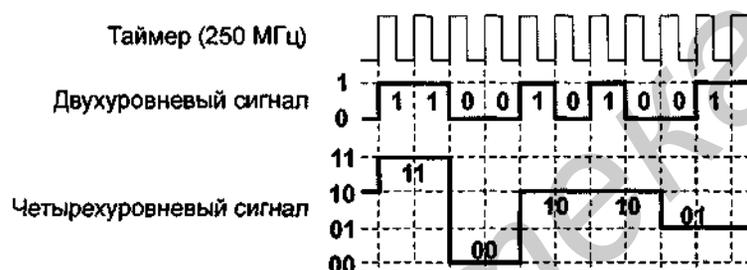


Рис. 7.25. Схема 4-уровневого кодирования PAM-4

Уровень MAC

Уровень MAC стандарта Gigabit Ethernet использует тот же самый протокол передачи CSMA/CD, что и Ethernet и Fast Ethernet. Основные ограничения на максимальную длину сегмента (или коллизионного домена) определяются этим протоколом.

В стандарте Ethernet IEEE 802.3 принят минимальный размер кадра 64 байта. Именно значение минимального размера кадра определяет максимальное допустимое расстояние между станциями (диаметр коллизионного домена). Время, в течение которого станция передает такой кадр – время канала – равно 512 ВТ или 51,2 мкс. Максимальная длина сети Ethernet определяется из условия разрешения коллизий, а именно время RTD, за которое сигнал доходит до удаленного узла и возвращается обратно, не должно превышать 512 ВТ (без учета преамбулы).

При переходе от Ethernet к Fast Ethernet скорость передачи возрастает, а время трансляции кадра длиной 64 байта соответственно сокращается – оно равно 512 ВТ или 5,12 мкс (в Fast Ethernet 1 ВТ = 0,01 мкс). Для того, чтобы можно было обнаруживать все коллизии до конца передачи кадра, необходимо удовлетворить одному из условий:

1. сохранить прежнюю максимальную длину сегмента, но увеличить время канала (и, следовательно, увеличить минимальную длину кадра);
2. сохранить время канала (прежний размер кадра), но уменьшить максимальную длину сегмента.

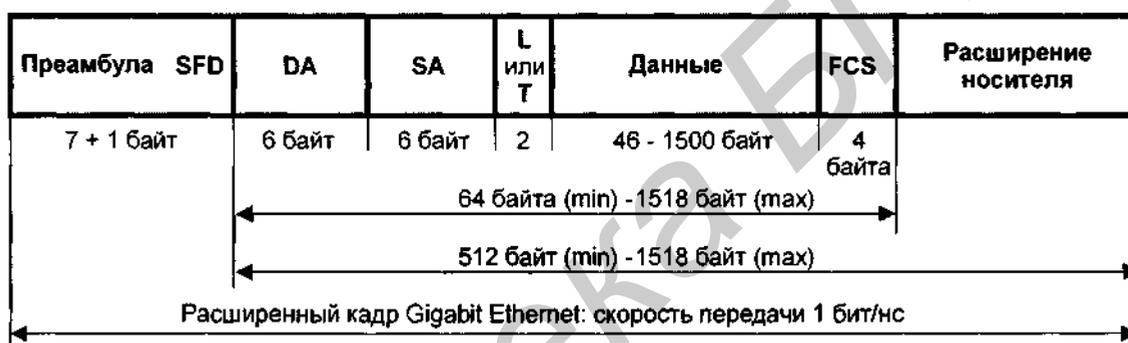
В Fast Ethernet был оставлен такой же минимальный размер кадра, как в Ethernet. Это сохранило совместимость, но привело к значительному уменьшению диаметра коллизионного домена.

В силу преимущества стандарт Gigabit Ethernet должен поддерживать те же минимальный и максимальный размеры кадра, которые приняты в Ethernet и Fast Ethernet. Но поскольку скорость передачи возрастает, то соответственно, уменьшается и время передачи пакета аналогичной длины. При сохранении прежней минимальной длины кадра это привело бы к уменьшению диаметра сети, который не превышал бы 20 м, что могло быть мало полезным. Поэтому при разработке стандарта Gigabit Ethernet было принято решение увеличить *время канала*. В Gigabit Ethernet оно составляет 512 БТ и в 8 раз превосходит *время канала* Ethernet и Fast Ethernet. Но, чтобы поддержать совместимость со стандартами Ethernet и Fast Ethernet, минимальный размер кадра не был увеличен, а было добавлено к кадру дополнительное поле, получившее название "*расширение носителя*" (carrier extension).

Расширение носителя

Символы в дополнительном поле обычно не несут служебной информации, но они заполняют канал и увеличивают "коллизийное окно". В результате коллизия будет регистрироваться всеми станциями при большем диаметре коллизийного домена.

Если станция желает передать короткий (меньше 512 байт) кадр, то при передаче добавляется это поле – *расширение носителя*, дополняющее кадр до 512 байт. Поле контрольной суммы вычисляется только для оригинального кадра и не распространяется на поле расширения. При приеме кадра поле расширения отбрасывается. Поэтому уровень LLC даже и не знает о наличии поля расширения. Если размер кадра равен или превосходит 512 байт, то поле расширения носителя отсутствует. На рис. 7.26 показан формат кадра Gigabit Ethernet при использовании расширения носителя.



SDF: Start of frame Delimiter - ограничитель начала кадра

DA: Destination Address - адрес назначения

SA: Source Address - адрес источника

L: длина поля данных (для кадра 802.3)

T: тип поля данных (для кадра Ethernet_II)

FCS: Frame Check Sequence - контрольная последовательность кадра

Рис. 7.26. Кадр Gigabit Ethernet с полем расширения носителя

Пакетная перегруженность

Расширение носителя – это наиболее естественное решение, которое позволило сохранить совместимость со стандартом Fast Ethernet и такой же диаметр коллизийного домена. Но оно привело к излишней трате полосы пропускания. До 448 байт (512-64) может расходоваться вхолостую при передаче короткого кадра. На стадии разработки стандарта Gigabit Ethernet компанией NBase Communications было внесено предложение по модернизации стандарта. Эта модернизация, получившая название *пакетная перегруженность* (packet bursting), позволяет эффективней использовать поле расширения. Если у станции/коммутатора имеется несколько небольших кадров для отправки, то первый кадр дополняется полем расширения носителя до 512 байт, и отправляется. Остальные кадры отправляются вслед с минимальным межкадровым интервалом в 96 бит, с одним важным исключением – межкадровый

интервал заполняется символами расширения (рис. 7.27 а). Таким образом, среда не замолкает между посылками коротких оригинальных кадров, и ни какое другое устройство сети не может вклиниться в передачу. Подобное пристраивание кадров может происходить до тех пор, пока полное число переданных байт не превысит 1518. Пакетная перегруженность уменьшает вероятность образования коллизий, поскольку перегруженный кадр может испытать коллизию только на этапе передачи первого своего оригинального кадра, включая расширение носителя, что безусловно увеличивает производительность сети, особенно при больших нагрузках (рис. 7.27 б).

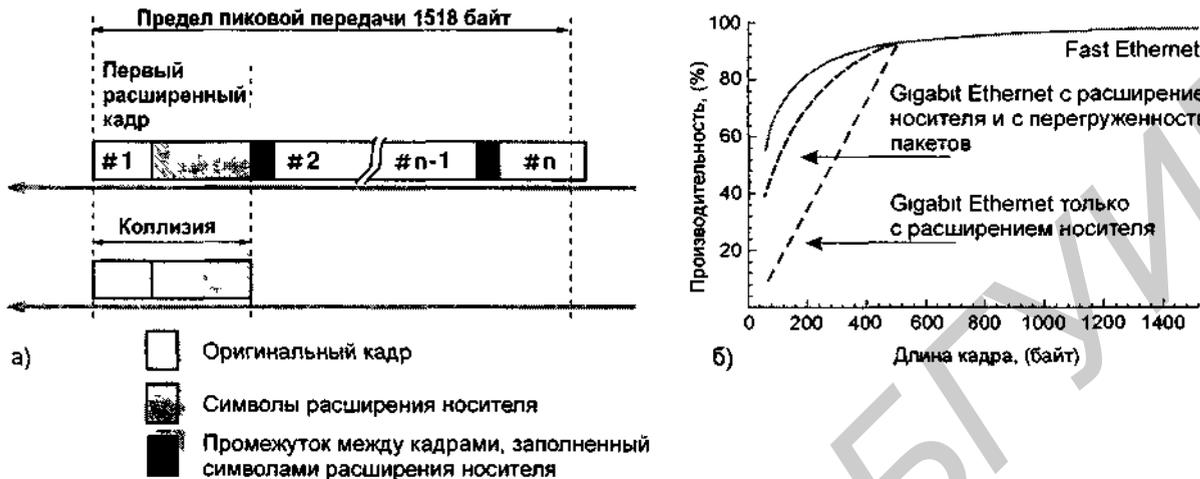


Рис. 7.27. Пакетная перегруженность: а) передача кадров; б) изменение полосы пропускания

Типы устройств

В настоящее время поставляется полный перечень сетевых продуктов Gigabit Ethernet: сетевые карты, повторители, коммутаторы, а также маршрутизаторы. Предпочтение отдается устройствам с оптическим интерфейсами (1000Base-FL, 1000Base-SX) Duplex SC. Появление устройств с интерфейсом 1000Base-T на UTP cat.5 с протяженностью сегментов до 100 м ожидается в начале 1999 года.

Сетевая карта Gigabit Ethernet. Выпускают сетевые карты на шины PCI, SBus и др. Ниже приведены основные технические характеристики сетевой карты G-NIC, выпускаемой фирмой Packet Engines [38]:

1. 64/32-разрядный PCI-мастер адаптер обеспечивает на частоте 33 МГц пропускную способность 2 Гбит/с.
2. Два независимых процессора, ответственных за прием и передачу пакетов, существенно разгружают центральный процессор рабочей станции.
3. Поддержка стандартов IEEE 802.3x дуплексной передачи и IEEE 802.3z обеспечивает максимальную совместимость с другими устройствами.

Поставляются драйверы для операционных систем: Windows 95 (NDIS3); Windows NT (NDIS4, NDIS5, Intel и DEC Alpha процессоры); Novell NetWare (ODI 3.12 или выше); Solaris (2.5x, PCI и SBus); DEC UNIX (4.3 BSD); SGI IRIX (5.3 и 6.2); HP-UX (10.20); Linux; FreeBSD.

Буферный повторитель. Устройства Ethernet поддерживают дуплексный режим как на физическом уровне, так и на уровне MAC. Традиционные повторители с портами RJ-45 (10Base-T, 100Base-TX), хотя и имеют дуплексную связь на физическом уровне, из-за логической топологии шины внутри себя могут поддерживать только полудуплексный режим, и поэтому создается коллизионный домен ограниченного диаметра. Хотя в стандарте Gigabit Ethernet допускается использование традиционных повторителей, представляется более эффективным применение нового устройства – буферного повторителя. Протокол CSMA/CD реализует метод доступа к сети, но не к сегменту. Буферный повторитель – это многопортовое устройство с дуплексными каналами связи (рис. 7.28). Каждый его порт имеет входной и

выходной буферы. Удаленное устройство, подключенное к повторителю, также должно поддерживать дуплексную связь на физическом и MAC уровнях. Очередной кадр, прибывая на входной порт, размещается в очереди входного буфера порта и далее пересылается в выходные буферы остальных портов (за исключением выходного буфера этого порта). Внутри повторителя обрабатывается протокол CSMA/CD, на основе которого кадры из входных буферов переходят в выходные буферы других портов.

Поскольку в сегментах нет коллизий, ограничения на их длину могут возникать только из-за физических характеристик кабельной системы. В этой связи ВОК представляется более перспективным, чем витая пара, ограниченная длиной 100 м.

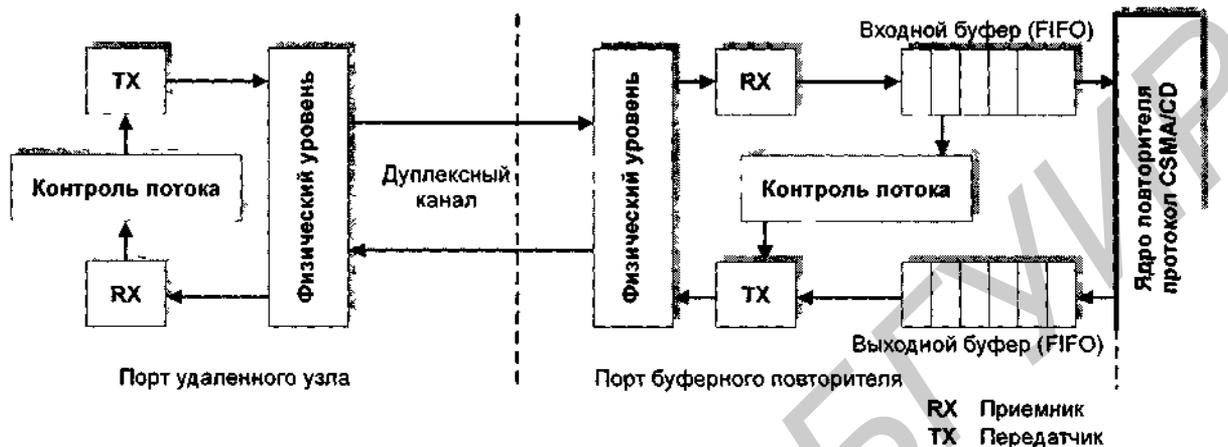


Рис. 7.28. Архитектура буферного повторителя Gigabit Ethernet

Удаленный узел, передавая серию кадров, способен переполнить входной буфер порта повторителя, что может привести к потере кадров. Во избежание этого стандартизован *основанный на кадрах контроль потока*, известный как 802.3х. Протокол работает на уровне MAC и предназначен для использования в дуплексных линиях.

Буферный повторитель обеспечивает дуплексную связь как и коммутатор, но он не такой дорогой, поскольку является просто расширением традиционного повторителя.

Коммутаторы. Перечислим наиболее важные черты коммутаторов Gigabit Ethernet:

- поддержка дуплексного режима по всем портам;
- поддержка контроля потока, основанного на кадрах IEEE 802.3х;
- наличие портов или модулей для организации каналов Ethernet, Fast Ethernet;
- поддержка физического интерфейса на одномодовом ВОК;
- возможность коммутации уровня 3;
- поддержка механизма QoS и протокола RSVP;
- поддержка стандарта IEEE 802.1q для организации виртуальных сетей.

Производители оборудования Gigabit Ethernet. Крупнейшими производителями оборудования Gigabit Ethernet являются компании: 3Com, Acacia Networks, Alteon Networks, AN-COR, Cabletron, Cisco Systems, Essential Communications, Foundry Networks, GigaLabs, Hewlett Packard, NBase Communications, Packet Engines, Rapid City Communications, XLNT Corp. [39].

7.8. Миграция Ethernet к магистральным сетям

Основные сценарии наращивание сетей до Gigabit Ethernet. Ниже рассмотрены три основных сценария: подключение серверов по каналам Gigabit Ethernet, замена канала связи Fast Ethernet между коммутаторами на канал Gigabit Ethernet, замена магистральной коммутации Fast Ethernet на Gigabit Ethernet.

Подключение серверов по каналам Gigabit Ethernet. Заменяется сетевая карта в файл-сервере, а в коммутатор устанавливается Gigabit Ethernet модуль (рис. 7.29). При этом дуп-

лексный канал может обеспечить расстояние по многомодовому волокну до 550 м, по одномодовому волокну – и до нескольких десятков км, и в перспективе по витой паре UTP Cat.5 – до 100 м (табл. 7.10). Функция контроля потока 802.3х при необходимости предотвратит переполнение буферов коммутатора со стороны потоков от файл-сервера.

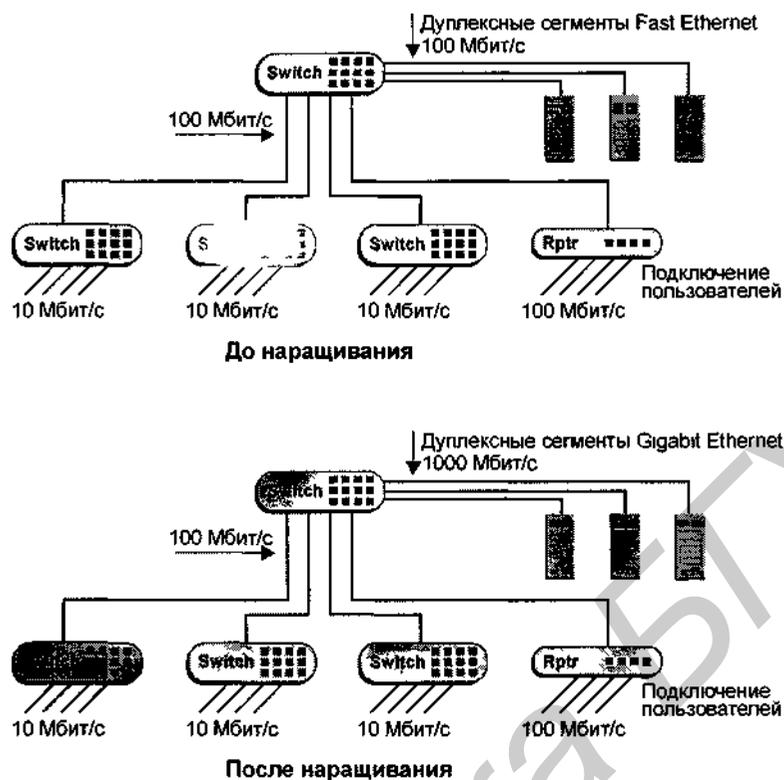


Рис. 7.29. Подключение серверов по каналам Gigabit Ethernet

Замена канала связи Fast Ethernet между коммутаторами на канал Gigabit Ethernet. Увеличение пропускной способности и устранение узкого места может быть выполнено путем установки в коммутаторы по одному модулю Gigabit Ethernet (рис. 7.30). Поддержка коммутаторами протокола 802.1Q, а также возможности коммутации третьего уровня позволят создавать распределенные виртуальные сети.

Замена магистральной коммутации Fast Ethernet на Gigabit Ethernet. Наилучшим образом для обеспечения наращиваемости сети на центральном узле подходит модульный коммутатор, допускающий установку как модулей с N портами 10/100 Мбит/с ($N=8-16$), так и модулей с M портами 1000 Мбит/с ($M = 4-8$). В коммутаторах для рабочих станций следует предусмотреть слот для подключения (при наращивании) Gigabit Ethernet up-link модуля. Таким образом, на первом этапе можно строить сеть с коммутацией Fast Ethernet, а позже произвести ее наращивание путем установки соответствующих коммутационных модулей Gigabit Ethernet в магистральный коммутатор и коммутаторы рабочих групп (рис. 7.31).

В заключении кратко рассмотрим некоторые дополнительные аспекты построения магистральных сетей: коммутацию, основанную на кадрах (IEEE 802.3х); виртуальные сети; тег-коммутацию (IEEE 802.1Q); протокол RSVP и др.

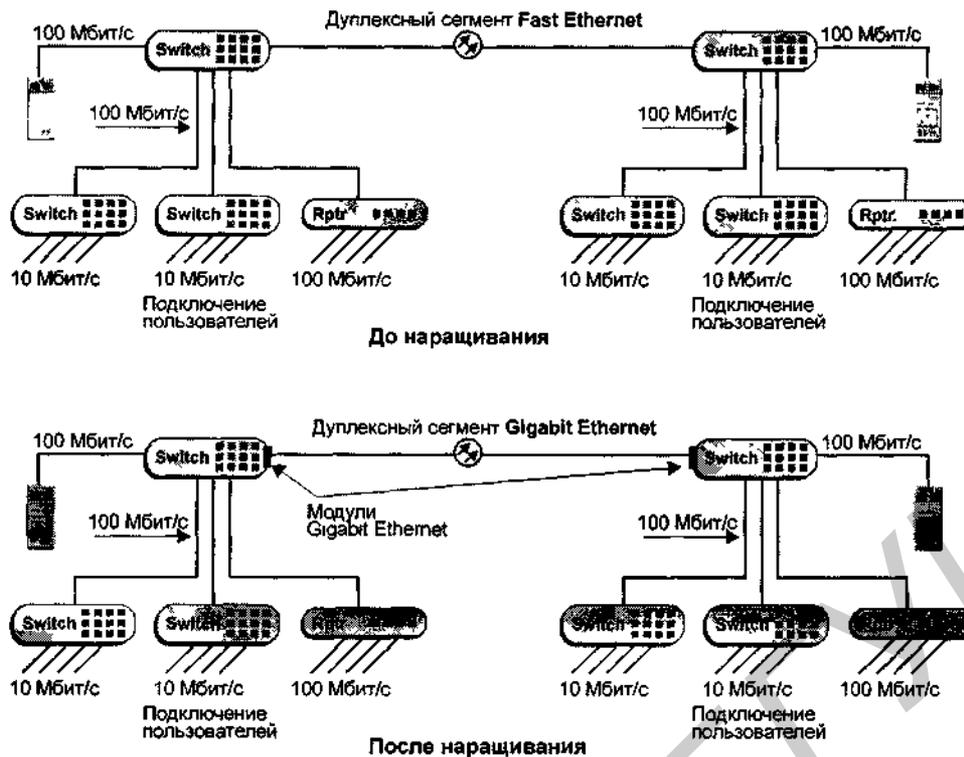


Рис. 7.30. Замена канала Fast Ethernet связи между коммутаторами на канал Gigabit Ethernet

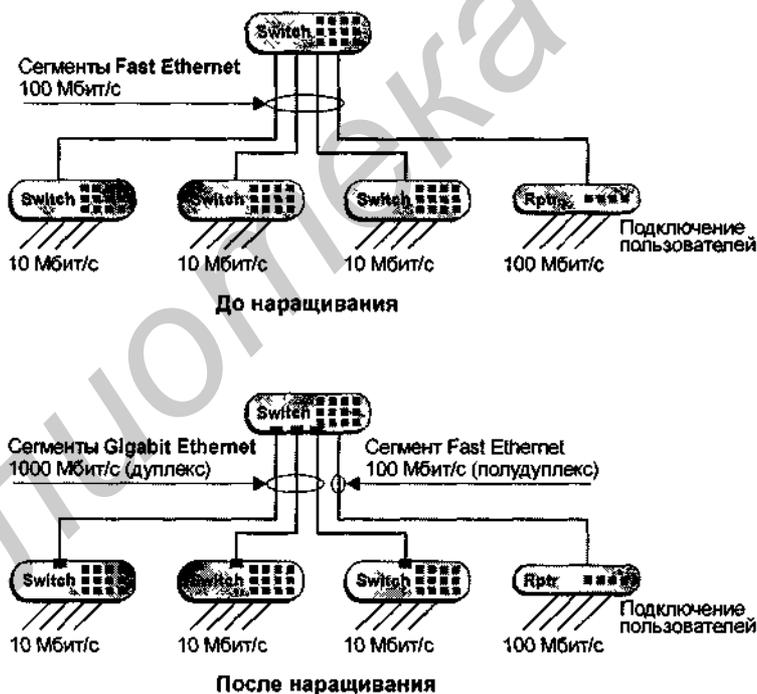


Рис. 7.31. Замена магистральной коммутации Fast Ethernet на Gigabit Ethernet

Эволюция методов контроля потока. На рис. 7.32 а показана простейшая сеть с повторителем Ethernet. Поскольку такая сеть (возможно, с несколькими повторителями) представляет один коллизийный домен, то ей присущи следующие два вытекающих из этого свойства: во-первых, диаметр сети должен быть ограничен на основании расчета времени

RTD, во-вторых, число рабочих станций, ведущих одновременную передачу не должно превышать 15-25, а соответственно полное число пользователей в зависимости использования ресурсов сети не должно превышать 50-100 на коллизийный домен. При таких условиях в сети Ethernet не будет происходить потерь кадров на уровне MAC, а сама сеть будет работать вполне стабильно. Данное решение не способно устроить крупные организации, тем более магистральные сети.

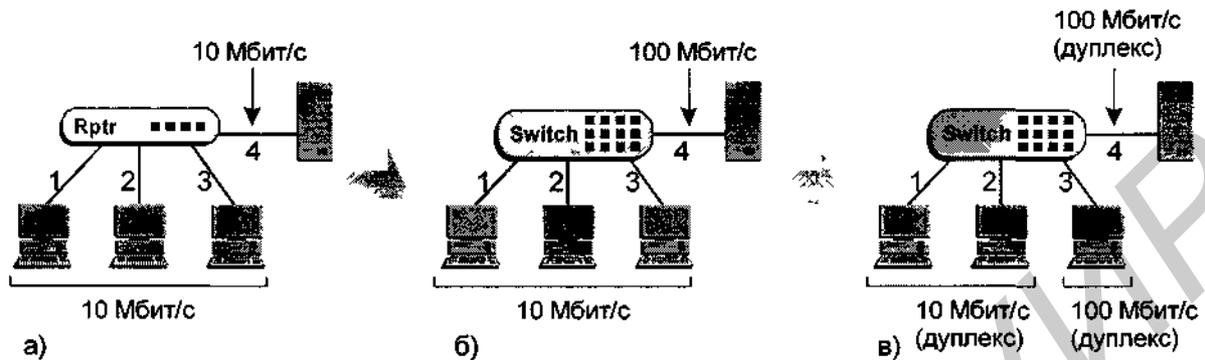


Рис. 7.32. Схема подключения рабочей группы: а) через повторитель; б) через коммутатор с полудуплексными соединениями (требуется механизм обратного давления); в) через коммутатор с дуплексными соединениями (требуется механизм 802.3х)

Дальнейшее наращивание сети возможно только с использованием коммутаторов (рис. 7.32 б). Коммутатор обеспечивает микросегментацию сети, улучшая ее работу как при использовании одноранговых приложений, так и при использовании приложений клиент-сервер; при этом скоростной канал Fast Ethernet с сервером имеет преимущества перед Ethernet, так как в приложениях клиент-сервер канал связи с сервером, если он был бы низкоскоростной, мог оказаться "бутылочным горлышком" сети. Однако коммутатор может приводить к потере кадров в случае переполнения своих буферов. Потери кадров в небольших сетях не опасны (благодаря проколам уровня сессий повторная отправка кадра произойдет в короткие сроки) и маловероятны, поскольку контроль потока на основе протоколов более высокого уровня позволяет оптимизировать скорость передачи до того, как начнут переполняться буферы коммутатора. Это требует достаточной буферной емкости. В крупных сетях с большим числом пользователей и большие буферы могут не спасти. Потери кадров в протяженных и крупных сетях не желательны, поскольку на повторную отставку кадра уходит значительно больше времени, что приводит к замедлению работы сети. Безусловно, лучшим решением был бы контроль потока на канальном уровне, в пределах стандарта Ethernet, как это реализовано в сети с одним коллизийным доменом. Контроль потока был бы еще более эффективным, если бы он осуществлялся между соседними устройствами (особенно в крупных корпоративных сетях). Именно для этой цели и был разработан механизм *обратного давления* (см. п. 7.2). Но он требует полудуплексного режима передачи в сегментах своих портов, поскольку использует свойства протокола CSMA/CD, и не способен работать на дуплексных линиях связи.

В то же время только дуплексный Ethernet позволяет увеличить пропускную способность и обеспечить протяженные сегменты на основе оптического волокна (рис. 7.32 в). Именно для дуплексных каналов "точка-точка" был разработан *основанный на кадрах контроль потока* (стандарт IEEE 802.3х) – протокол, работающий на уровне MAC. В стандарте Gigabit Ethernet он становится неотъемлемой чертой выпускаемых коммутаторов, буферных повторителей и сетевых карт. Поддержка стандарта 802.3х становится крайне желательной при разработке новых магистральных коммутаторов с портами Fast Ethernet и Ethernet. Подключение рабочих станций к выделенным портам коммутатора по дуплексным каналам, а не через повторитель, более эффективно для организации видеоконференций, компьютерной телефонии и мультимедиа приложений.

Виртуальные сети. *Виртуальной сетью VLAN (virtual LAN)* называется логически объединенная группа пользователей сети, в противоположность их физическому объединению,

основанному на территориальном признаке и топологии сети. Технологии VLAN наиболее широко используются в коммутируемых сетях, хотя и не исключается применение маршрутизаторов. Объединение пользователей в виртуальные сети может происходить на основе портов, адресов или протоколов.

Основанная на портах виртуальная сеть – наиболее простой способ группирования сетевых устройств. Все удаленные устройства, приписанные к определенным портам коммутатора, независимо от их адресов, протоколов, приложений объединяются в одну виртуальную сеть.

Основанная на адресах виртуальная сеть может поддерживать несколько виртуальных сетей на одном коммутируемом порту. Устройства выделяются в подсети на основе их адресов (обычно MAC-адресов).

Основанная на протоколах виртуальная сеть объединяет в различные логические группы сетевые устройства на основе протоколов IP, IPX и т.д. Устройства, выполняющие такую функцию, обычно работают не на канальном уровне, а на сетевом, и называются маршрутизаторами. Устройства, способные работать с несколькими протоколами, называются мультипротокольными маршрутизаторами.

Построение виртуальных сетей, основанных на портах, долгое время ограничивалось использованием только одного коммутатора в сети, а решения с несколькими коммутаторами были нестандартными. В настоящее время близится к завершению разработка стандарта IEEE 802.1Q, позволяющего строить распределенные виртуальные сети с несколькими коммутаторами. Основой будущего стандарта является *тег-коммутация* (tag switching) [40]. При передаче кадров между коммутаторами (как для одноадресных, так и для широковещательных) используется специальный теговый формат – добавляются поля, общим объемом 2 байта: идентификатор виртуальной сети (12 бит); поле приоритета (3 бита) и поле инкапсуляции TR (1 бит). При передаче кадра от станции А к станции В коммутатор 1 добавляет в указанные поля информацию о виртуальной сети (рис. 7.33). На основании этой информации коммутатор 2 сначала определяет, что кадр предназначен для виртуальной сети V1, затем устраняет эту информацию – самим станциям в пределах виртуального домена она не нужна – и уже на основании MAC-таблицы для виртуальной сети V1 коммутирует кадр в порт для станции В.

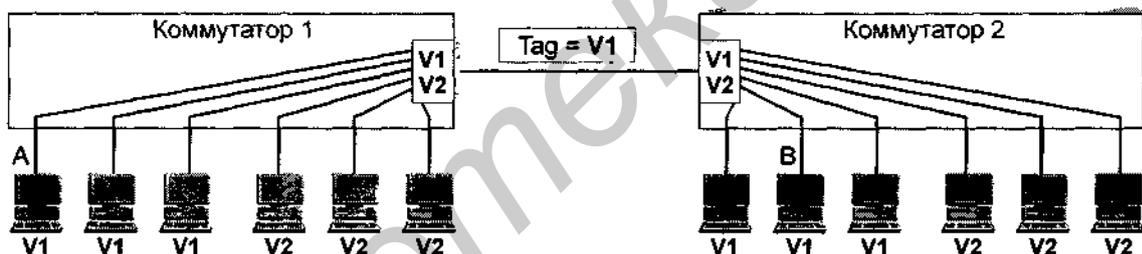


Рис. 7.33. Различные технологии объединения пользователей в виртуальные сети

Принятие стандарта IEEE 802.1Q позволит разработчикам локальных сетей использовать дополнительные полезные возможности:

- MAC Address Tagging – приписываемая тег-информация зависит от MAC-адреса назначения;
- Frame Type Tagging – приписываемая информация зависит от протоколов более высокого уровня (например, от IP или IPX);
- Layer 3 Tagging – приписываемая информация зависит от установленных IP подсетей;
- Policy-based Tagging – приписываемая информация чувствительна к различным параметрам окружающей обстановки, например, времени суток.

Протокол IEEE 802.1Q после его стандартизации будет использоваться в стандарте Gigabit Ethernet. Многие компании уже выпускают коммутаторы Gigabit Ethernet, поддерживающие еще не окончательно сформированные спецификации IEEE 802.1Q.

Протокол RSVP. В современных сетях роль приложений реального времени существенно возросла. Локальные сети, первоначально задумывавшиеся исключительно для передачи данных, сегодня широко используются для передачи мультимедиа приложений. Набирают темпы компьютерная телефония и видеоконференцсвязь. В связи с этим более остро встает

вопрос минимизации задержек и регуляризации трафика на узлах коммутации и маршрутизации сети Internet. Протокол RSVP (Resource Reservation Protocol) призван обеспечить необходимое качество обслуживания для полноценной эксплуатации таких приложений. RSVP разработан для работы с протоколом TCP/IP, который является основным для сети Internet.

Оконечный узел на основе протокола RSVP запрашивает у сети определенное качество обслуживания QoS (Quality of Service), необходимое для данного приложения. С целью резервирования необходимых ресурсов, RSVP переносит запрос по сети, обращаясь к каждому узлу, через которые предполагается осуществлять передачу потока данных.

Для резервирования на отдельном узле коммутации/маршрутизации специальная программа – демон RSVP – обращается к двум модулям принятия решения: к модулю управления доступом и к административному модулю (рис. 7.34 а). Модуль управления доступом определяет, достаточно ли ресурсов на узле, чтобы удовлетворить запрос QoS. Административный модуль выявляет, имеет ли пользователь административное разрешение выполнить резервирование. Если хотя бы одна из проверок не дает положительного результата, программа RSVP возвращает на запрашивающий удаленный узел уведомление об ошибке, тем самым отвечая отказом. Если обе проверки положительные, то демон RSVP устанавливает в соответствии с запросом QoS параметры в классификаторе пакетов и планировщике пакетов. Классификатор пакетов определяет класс QoS для каждого пакета, а планировщик пакетов устанавливает порядок движения пакетов, чтобы обеспечить обещанную полосу пропускания на узле.

Важная особенность RSVP – его масштабируемость до очень больших групп с многоадресной доставкой пакетов, поскольку он использует ориентированные на приемный узел запросы, которые сливаются по мере их прохождения по многоадресному дереву. Запрос на резервирование канала посылает не узел, собирающийся вести многоадресную трансляцию, а каждый из узлов-получателей. Нет необходимости сигналу резервирования следовать по всему дереву до передающего узла, вместо этого сигнал идет только до ближайшего узла, сливаясь с подобными сигналами от других ветвей (рис. 7.34 б). Хотя протокол RSVP разработан для использования преимущественно в многоадресных приложениях, он может также служить для передачи кадров, имеющих один адрес.

RSVP также разработан с целью увеличения надежности существующих алгоритмов маршрутизации в сети Internet. RSVP не осуществляет свою собственную маршрутизацию, вместо этого он использует лежащие в его основе протоколы маршрутизации, чтобы определить, каким образом следует обеспечивать передачу зарезервированного потока данных. Если маршрутизаторы перенаправляют движения потоков, подстраиваясь под изменяющуюся топологию сети, RSVP привязывает свои резервирования к новым путям независимо от того, действует ли уже данное резервирование или нет.

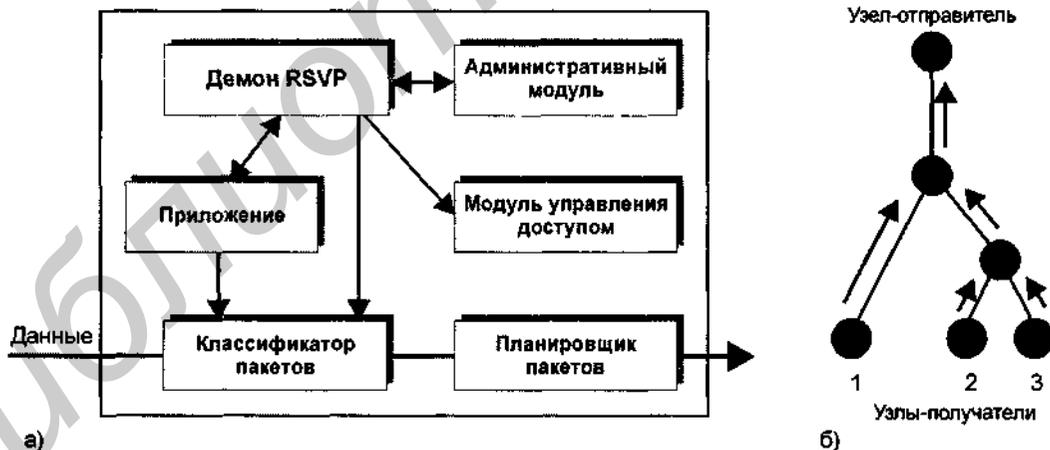


Рис. 7.34. а) Схема взаимодействия демона RSVP с устройством, поддерживающим QoS; б) Движение запросов резервирования полосы в многоадресном дереве

Технологии Ethernet и ATM в магистральных сетях. Охватывая более высокие уровни модели OSI, протоколы RSVP и IEEE 802.1Q не относятся к стандарту Ethernet, но делают зна-

чительно более эффективным его использование, в особенности использование стандарта Gigabit Ethernet в ранге магистральных сетей. Главное отличие контроля качества QoS на основе RSVP от QoS, реализованного в технологии ATM, заключается в том, что RSVP рассчитан на работу в дейтаграммных сетях и не требует наличия виртуальных каналов. Потенциально сегодня ATM предоставляет более разнообразные возможности по QoS по сравнению с другими сетевыми технологиями. Однако на практике возможности манипуляции функцией QoS, одной из блестящих черт ATM, в рамках конкретных приложений очень скудны, и не предвидится существенный прогресс в этой области. Очерчены предварительные спецификации будущего стандарта 10G Ethernet (скорость передачи 10 Гбит/с), начало поставок оборудования планируется в 2001 году [41]. Таким образом, стандарт Ethernet с масштабируемой иерархией 10/100/1000/... становится мощной сетевой технологией, жестко конкурирующей с ATM как на уровне корпоративных, так и магистральных сетей.

Литература к главе 7

1. N. Abramson. "Development of the ALOHNET"//IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-31, March, 1985
2. Digital Equipment Corp., Intel Corp., and Xerox Corp. The Ethernet: A Local Area Network, Data Link Layer and Physical Layer Specifications, Version 1.0, Sept., 1980.; Version 2.0, Nov., 1980
3. ISO/IEC Standard 8802-3. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications [ISO publication of IEEE Standard 802.3], 1996
4. B.1.5.2 Maximum Collision-Fragment Size, Annex B. ISO/IEC Standard 8802-3, 1996 (E)
5. W. Stallings. Local & Metropolitan Area Networks. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1997. – 605 p.
6. D. Boggs, J. Mogul, Ch. Kent. "Measured Capacity of an Ethernet: Myth and Reality". Digital, Western Research Laboratory, Palo Alto, 1988, pp. 1-20
7. Media Converter and Media Conversion Kits. Allied Telesyn, 1997, <http://www.alliedtelesyn.com/prod12t.htm>
8. PDF Documents: Enterprise Switches, Switches, Expansion Modules, Hub Data Sheets, Giga-HUB Modules, Transceiver and Adapter Data Sheets, Miscellaneous Manuals. White Papers, NBase Advertisements. NBase Communications, 1998, <http://www.nbase.com/pdf/>
9. Products and Ordering. SVEC's complete product list, 1997, <http://www.svec.com.tw/Products/producte.htm>
10. Ethernet Transceiver / Repeater. SURECOM Technology, 1998, <http://www.surecom-net.com/product/pro-8.htm>
11. Media Conversion Products - Go the Distance with Fiber. Transition Networks, 1998, http://www.transition.com/products/converter_index.html
12. 10& 100Mbps "twister" Media Translators in Standard Rackmount Chassis. Lancast, 1998, <http://www.lancast.com/7000.html>
13. Networking Products. Adaptec, 1998, <http://www.adaptec.com/support/overview/networking.html>
14. Products: Media Conversion, Media Conversion, Media Conversion Switches, Bridges/LAN Extenders, Hubs/Repeaters, Transceivers & Network Interface Cards. IMC Networks, 1998, <http://www.imcnetworks.com/>
15. Welcome to Net Optics' Global Source. NetOptics 1998, <http://www.netoptics.com/>
16. F. Halsall, Data Communications, Computer Networks and Open Systems. Addison-Wesley, 1996. – 907 p.
17. 7.4 10-Mbps Configuration Guidelines: Model 1, Quick Reference Guide to Ethernet. Charles Spurgeon, 1995, http://wwwhost.ots.utexas.edu/ethernet/10quickref/ch7qr_5.html
18. 7.5 10-Mbps Configuration Guidelines: Model 2, Quick Reference Guide to Ethernet. Charles Spurgeon, 1995, http://wwwhost.ots.utexas.edu/ethernet/10quickref/ch7qr_6.html

8. Полностью оптические сети

Для передачи больших потоков информации (1 Гбит/с и выше) по волокну на расстояния до сотен километров и выше требуется решение множества задач. Главными препятствиями на пути построения протяженных сегментов без регенераторов являются: дисперсия распространяемого по волокну оптического сигнала, влияние нелинейных эффектов в мультиплексной оптической линии, вносимые шумы и помехи.

Создание качественно новых типов одномодовых волокон и более совершенных оптических усилителей в последние 5-8 лет, а также улучшение технических характеристик компонентной базы в целом позволило увеличить расстояние и пропускную способность ВОЛС и стало началом масштабного внедрения новых концепций и технологий построения волоконно-оптических сетей на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Полностью оптические сети AON (All-optical Networks) представляют класс сетей, в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, ретрансляции играют не электронные (оптоэлектронные), а чисто оптические технологии.

Полностью оптические сети претендуют на роль главенствующей сетевой технологии, способной обеспечивать гигантскую полосу пропускания как для сегодняшних, так и завтрашних сетевых информационных приложений. На протяжении последних нескольких лет в этой области ведутся интенсивные исследования, создается более совершенное оборудование (лазеры с перестраиваемой длиной волны, оптические волновые мультиплексоры WDM, широкополосные оптические усилители EDFA, оптические коммутаторы), строятся прототипы архитектур, вырабатываются стандарты. Среди фирм, которые наиболее активно ведут такие исследования, следует выделить: Lucent Technologies, Alcatel, Ericsson, Fujitsu, Hewlett Packard, NEC, NTT, Nortel, Siemens [1-4].

8.1. Основные определения и элементы

Большинство оптических коммуникационных устройств и элементов, применяемых в AON, используют цифровую передачу сигнала с модуляцией интенсивности, при которой бинарной 1 соответствует передача света большой интенсивности, а бинарному 0 – передача света низкой интенсивности. Последнее связано с тем, что оптические усилители EDFA вносят дополнительный шум в усиление оптического сигнала. Ниже приведены основные устройства и элементы, применяемые в AON.

Лазеры и светодиоды. В качестве источников излучения могут использоваться светодиоды и лазеры. Светодиоды рассчитаны на большой диаметр сердцевины волокна (многомодовые волокна), а лазеры лучше подходят для передачи сигнала по одномодовому волокну. Типичные значения спектральной полосы излучения составляют для светодиодов от 20 до 100 нм, для многомодовых лазерных диодов от 1 до 5 нм и для одномодовых лазерных диодов менее 0,1 нм. Потребляемая мощность для светодиодов – около 10 мВт, и порядка 1 мВт для лазерных диодов. Выпускаются как недорогие коммерческие pin-фотодиоды на основе InGaAsP, работающие на длине волны 1300 нм и обеспечивающие скорость передачи до 100 Мбит/с, так и специализированные лазеры с распределенной обратной связью (DFB), предназначенные для работы в окне 1550 нм и обеспечивающие скорость передачи до 10 Гбит/с.

Волокно. Наибольшее распространение получили три типа одномодового волокна: одномодовое волокно со ступенчатым профилем (стандартное волокно, standard fiber, SF), волокно со смещенной дисперсией (dispersion shifted fiber, DSF), волокно с ненулевой смещенной дисперсией (non-zero dispersion shifted fiber, NZDSF), а также два типа градиентного многомодового волокна стандартов 50/125 и 62,5/125. В протяженных магистралах применяются исключительно одномодовые волокна из-за лучших дисперсионных характеристик. Для многоканальной мультиплексной передачи лучше всего подходит волокно типа NZDSF, а наименее удачным оказалось одномодовое волокно DSF.

Использование многомодового волокна ограничено локальными сетями с характерными длинами сегментов до 2 км. В то же время в локальных сетях все чаще начинает использоваться, наряду с многомодовым, и одномодовое волокно, обеспечивающее более высокую полосу пропускания. Это связано с падением стоимости лазерных оптических передатчиков и возрастающим числом сетевых приложений, требующих большой полосы пропускания, которую может обеспечить только одномодовое волокно.

Приемопередатчики. Выпускаются разнообразные приемо-передающие оптоэлектронные модули, предназначенные для сетей FDDI, Fast Ethernet (скорость передачи 100 Мбит/с, частота модуляции 125 МГц), ATM (STM-1 155Мбит/с, частота модуляции 194 МГц), более быстрые для сетей STM-4 622 Мбит/с (частота модуляции 778 МГц) и Gigabit Ethernet (1000 Мбит/с, частота модуляции 1250 МГц), и еще более быстрые, предназначенные для передачи каналов STM-16 (2,5 Гбит/с), и, наконец, STM-64 (10 Гбит/с).

Пассивные оптические мультиплексоры/демультиплексоры (см. п. 8.2). В настоящее время выпускается огромное число устройств, от простых мультиплексоров и направленных ответвителей WDM, до сложных устройств, обеспечивающих плотное волновое мультиплексирование/демультиплексирование (DWDM) с числом каналов до 40 и более.

Оптический мультиплексор собирает несколько простых сигналов разных длин волн из нескольких волокон в мультиплексный сигнал, распространяющийся по одному волокну. Демультимплексор выполняет обратную функцию и обеспечивает выделение каналов в отдельные волокна из сложного мультиплексного сигнала, представленного множеством каналов и идущего по одному волокну.

Оптические усилители (см. п. 8.4) требуются в сетях при больших расстояниях между регенераторами. В полностью оптических сетях широкое распространение получили эрбиевые усилители EDFA, использующие лазер накачки с длиной волны 980 нм или 1480 нм. Работа в диапазоне от 1535 до 1560 нм, они могут обеспечивать усиление входного сигнала на 30-38 дБ в зависимости от его длины волны. Усилители EDFA не только заменили дорогостоящие оптоэлектронные системы регенерации оптического сигнала, но обеспечили возможность усиления многоканального WDM сигнала, сокращая число электронных регенераторов на протяженной оптической мультиплексной линии.

Оптические коммутаторы (см. п. 8.5) выполняют в полностью оптических сетях ту же функцию, что и обычные электронные коммутаторы в традиционных сетях, а именно обеспечивают коммутацию каналов или коммутацию пакетов. Наряду с простейшим коммутатором 2x2 в настоящее время начали поставляться коммутаторы с числом портов 4x4, 8x8 и 16x16.

Фильтры предназначены для выделения одного нужного канала из множества мультиплексных каналов, распространяемых в волокне. Поскольку фотоприемники имеют обычно широкую спектральную область чувствительности, то фильтр необходим для того, чтобы подавить (ослабить) соседние каналы. Наряду с фильтрами, предназначенными для работы на определенной длине волны, выпускаются также фильтры с перестраиваемой длиной волны. Функции фильтра может выполнять оптический демультиплексор.

Волновые конвертеры (см. п. 8.6) предназначены для преобразования одной длины волны в другую. Так, если информационный сигнал в подсети 1 был представлен каналом на длине волны, которая уже задействована в другой подсети – подсети 2, то волновой конвертер может преобразовать этот сигнал при переходе из подсети 1 в подсеть 2 на другую свободную в подсети 2 длину волны, обеспечив прозрачную связь между устройствами в разных подсетях.

Общепринятые обозначения элементов полностью оптической сети приведены в табл. 8.1.

8.2. Плотное волновое мультиплексирование

Мультиплексоры DWDM

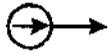
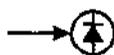
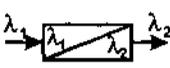
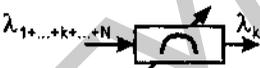
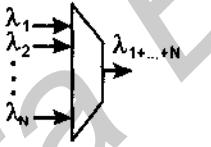
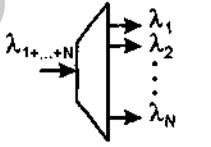
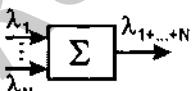
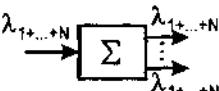
Мультиплексорам DWDM (в отличие от более традиционных WDM) присущи две отличительные черты:

- использование только одного окна прозрачности 1550 нм, в пределах области усиления EDFA (1530-1560 нм);
- малые расстояния $\Delta\lambda$ между мультиплексными каналами (3,2 / 1,6 / 0,8 или 0,4 нм).

Кроме этого, поскольку мультиплексоры DWDM рассчитаны на работу с большим числом каналов (до 32-х и более), то наряду с устройствами DWDM, в которых мультиплексируются (демультиплексируются) одновременно все каналы, допускаются также новые устройства, не имеющие аналогов в системах WDM и работающие в режиме добавления или вывода одного и более каналов в/из основного мультиплексного потока, представленного большим числом других каналов. Так как выходные порты/полюса демультиплексора закреплены за оп-

ределенными длинами волн, говорят, что такое устройство осуществляет пассивную маршрутизацию по длинам волн. Из-за малых расстояний между каналами и необходимости работы с большим числом каналов одновременно, изготовление мультиплексоров DWDM требует значительно большей прецизионности по сравнению с WDM мультиплексорами (использующими обычно окна прозрачности 1310 нм, 1550 нм или дополнительно область длин волн в окрестности 1650 нм). Также важно обеспечить высокие характеристики по ближним (коэффициент направленности) и дальним (изоляция) переходным помехам на полюсах DWDM устройства. Все это приводит к более высокой стоимости DWDM устройств по сравнению WDM.

Таблица 8.1. Обозначения элементов AON

Лазер		Приемный оптоэлектронный модуль	
Оптическое волокно		Оптический усилитель EDFA	
Волновой конвертер		Оптический фильтр	
Оптический коммутатор		Аттенюатор	
Устройство волнового мультиплексирования (MUX), демультиплексирования (DEMUX)			
Оптический комбайнер, разветвитель			

Типовая схема DWDM мультиплексора с зеркальным отражающим элементом показана на рис. 8.1 а. Рассмотрим его работу в режиме демультиплексирования. Приходящий мультиплексный сигнал попадает на входной порт. Затем этот сигнал проходит через волновод-пластину и распределяется по множеству волноводов, представляющих дифракционную структуру AWG (arrayed waveguide grating). По-прежнему сигнал в каждом из волноводов остается мультиплексным, а каждый канал ($\lambda_1, \lambda_2, \dots$) остается представленным во всех волноводах. Далее происходит отражение сигналов от зеркальной поверхности, и, в итоге, световые потоки вновь собираются в волноводе-пластине, где происходит их фокусировка и интерференция – образуются пространственно разнесенные интерференционные максимумы интенсивности, соответствующие разным каналам. Геометрия волновода-пластины, в частности, расположение выходных полюсов, и длины волноводов структуры AWG рассчитываются таким образом, чтобы интерференционные максимумы совпадали с выходными полюсами. Мультиплексирование происходит обратным путем.

Другой способ построения мультиплексора базируется не на одной, а на паре волновод-пластин (рис. 8.1 б). Принцип действия такого устройства аналогичен предыдущему случаю за исключением того, что здесь для фокусировки и интерференции используется дополнительная пластина.

DWDM мультиплексоры, являясь чисто пассивными устройствами, вносят большое затухание в сигнал. Например, потери для устройства (рис. 8.1 а), работающего в режиме демультиплексирования составляют 10-12 дБ, при дальних переходных помехах < -20 дБ, и полуширине спектра сигнал 1 нм, (по материалам Oki Electric Industry [5]). Из-за больших потерь часто возникает необходимость установления оптического усилителя перед и/или после DWDM мультиплексора.

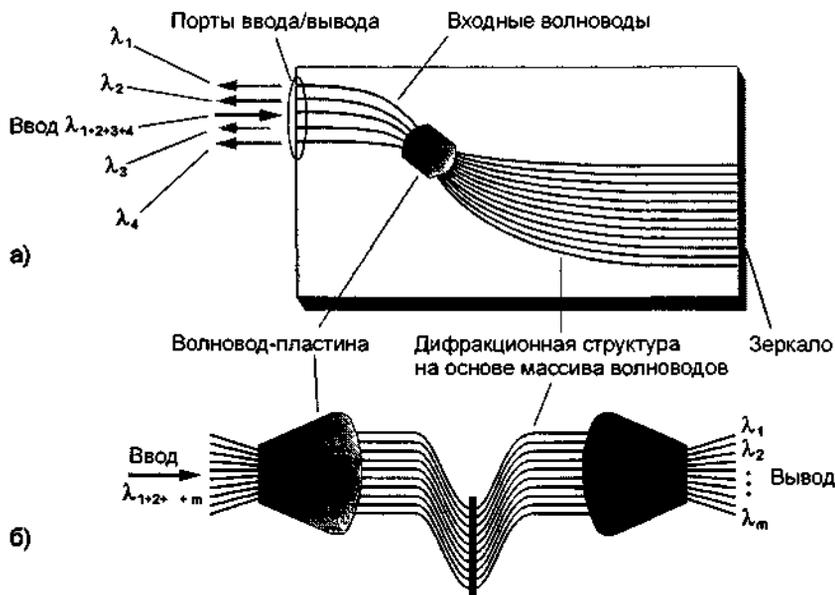


Рис. 8.1. Схемы DWDM мультиплексоров: а) с отражающим элементом [5]; б) с двумя волноводами-пластинами [6]

Пространственное разделение каналов и стандартизация DWDM

Самым важным параметром в технологии плотного волнового мультиплексирования бесспорно является расстояние между соседними каналами. Стандартизация пространственного расположения каналов нужна, уже хотя бы потому, что на ее основе можно будет начинать проведение тестов на взаимную совместимость оборудования разных производителей. Сектор по стандартизации телекоммуникаций ИТУ-Т утвердил частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц ($\Delta\lambda \approx 0,8$ нм), (табл. 8.2). В то же время дебаты продолжают идти вокруг принятия частотного плана с еще меньшим расстоянием между каналами 50 ГГц ($\Delta\lambda \approx 0,4$ нм). Без понимания того, какие ограничения и преимущества имеет каждый частотный план, операторы связи и организации, планирующие наращивание пропускной способности сети, могут столкнуться со значительными трудностями и излишними инвестициями.

Сетка 100 ГГц. В табл. 8.2 показаны сетки частотного плана 100 ГГц с различной степенью разреженности каналов. Все сетки, кроме одной 500/400, имеют равноудаленные каналы. Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств полностью оптической сети, а также позволяет легче ее наращивать. Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от трех основных факторов: типа используемых оптических усилителей (кремниевое или фтор-цирконатное); скорости передачи на канал – 2,4 Гбит/с (STM-16) или 10 Гбит/с (STM-64); влияния нелинейных эффектов, причем все эти факторы сильно взаимосвязаны между собой.

Стандартные усилители EDFA на кремниевом волокне имеют один недостаток – большую вариацию коэффициента усиления в области ниже 1540 нм (рис. 4.19, гл. 4), что приводит к более низким значениям соотношения сигнал/шум и нелинейности усиления в этой области. Одинаково нежелательны как сильно низкие, так и сильно высокие значения коэффициента усиления. С ростом полосы пропускания минимальное допустимое по стандарту соотношение сигнал/шум возрастает – так, для канала STM-64 оно на 4-7 дБ выше, чем для STM-16. Таким образом, нелинейность коэффициента усиления кремниевое усилителя EDFA сильнее ограничивает размер зоны для мультиплексных каналов STM-64 (1540-1560 нм), чем для каналов STM-16 и меньшей емкости (где можно использовать практически всю зону усиления кремниевое EDFA, несмотря на нелинейность).

Таблица 8.2. Частотный план ITU-T [7]

Частота, ГГц	Интервал 100 ГГц (8 каналов и более)	Интервал 200 ГГц (4 канала и более)	Интервал 400 ГГц (только 4 канала)	Интервал 500/400 ГГц (только 8 каналов)	Интервал 600 ГГц (только 4 канала)	Интервал 1000 ГГц (только 4 канала)	Длина волны, нм
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
194,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

Сетка 50 ГГц. Более плотный, пока не стандартизированный, частотный план сетки с интервалом 50 ГГц позволяет эффективней использовать зону 1540-1560 нм, в которой работают стандартные кремниевые EDFA. Наряду с этим преимуществом есть и минусы у этой сетки. Во-первых, с уменьшением межканальных интервалов возрастает влияние эффекта четырехволнового смешивания, что начинает ограничивать максимальную длину межрегенерационной линии (линии на основе только оптических усилителей). Во-вторых, малое межканальное расстояние $\approx 0,4$ нм может приводить к ограничениям в возможности мультиплексирования каналов STM-64 (рис. 8.2). Как видно из рисунка, мультиплексирование каналов STM-64 с интервалом 50 ГГц не допустимо, поскольку тогда возникает перекрытие спектров соседних каналов [7]. Только если имеет место меньшая скорость передачи в расчете на канал (STM-4 и ниже), перекрытие спектров не возникает. В-третьих, при интервале 50 ГГц требования к перестраиваемым лазерам,

мультиплексорам и другим компонентам становятся более жесткими, что снижает число потенциальных производителей оборудования, а также ведет к увеличению его стоимости.

В настоящее время ведутся работы по созданию надежных фтор-цирконатных усилителей EDFA, обеспечивающих большую линейность (во всей области 1530-1560 нм) коэффициента усиления. С увеличением рабочей области усилителей EDFA становится возможным мультиплексирование 40 каналов STM-64 с интервалом 100 ГГц общей емкостью 400 ГГц в расчете на волокно.

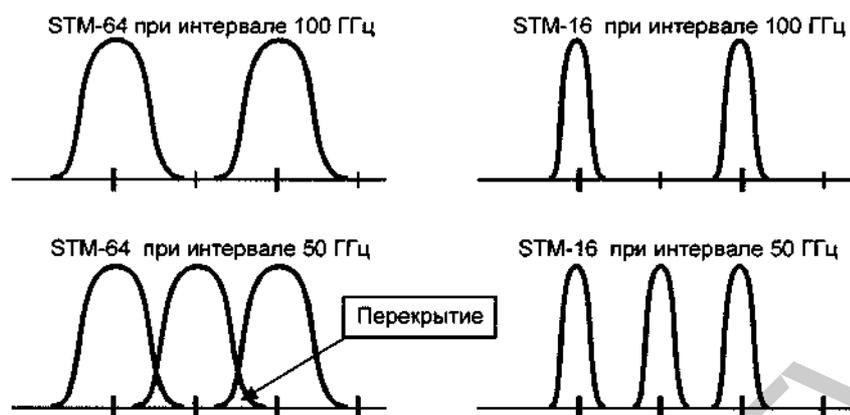


Рис. 8.2. Спектральное размещение каналов в волокне

Для справки в табл. 8.3 приведены технические характеристики одной из мощных мультиплексных систем, использующих частотный план 100/50 ГГц, производства фирмы Ciena Corp.

Таблица 8.3. Технические характеристики транспортной системы DWDM – модели MultiWave Sentry™ 4000 (по материалам Ciena Corp. [8])

Системный уровень	
Емкость, Гбит/с	100 (40 каналов × 2,5 Гбит/с)
Формат	OC-48/(STM-16)/OC-48c/STM-16c
Частотный план	50 ГГц
Возможные конфигурации	5 пролетов × 25 дБ (500 км) 2 пролета × 33 дБ (240 км)
Системная частота появления ошибок (BER)	$< 10^{-15}$
Канальные интерфейсы	
Формат	Короткие/промежуточные дистанции STM-16/G.957 I-16 & S.16.1 внутриофисные приложения
Уровень входного сигнала, дБм	от -18 до -3
Уровень выходного сигнала, дБм	-5 ± 0,5
Длина волны вводимого излучения, нм	1250-1600
Сетевое управление	
Система управления	WaveWatch™ производства CIENA по SNMP или TMN
Стандартный интерфейс	VT100 (TM), асинхронный RS-232, удаленный доступ через Telnet, ITU TMN, TL-1, SNMP
Мониторинг работоспособности каналов	Канальные битовые ошибки через B1 заголовка SDH, контроль оптической мощности в каждом канале
Удаленные интерфейсы	RS-422/X.25 (TL-1 интерфейс), IP/802.3 через 10Base-T
Оптический служебный канал	2,048 Мбит/с на длине волны 1625 нм
Характеристики по питанию	
Напряжение питания, В постоянный ток	от -48 до -58
Потребляемая мощность при 40 каналах, Вт	800 типичное, 925 (максимум) – стойка 1 1000 типичное, 1250 (максимум) – стойка 2

8.3. Применение оптических усилителей EDFA

Развитие технологии оптического усиления на основе EDFA сильно изменило методологию конструирования волоконно-оптических систем связи. Традиционные волоконно-оптические системы используют повторители-регенераторы, повышающие мощность сигнала (рис. 8.3 а). Когда длина между удаленными узлами начинает превосходить по условиям затухания сигнала максимальную допустимую длину пролета между соседними узлами, в промежуточных точках устанавливаются дополнительные регенераторы. Они принимают слабый сигнал, усиливают его в процессе оптоэлектронного преобразования, восстанавливают скважность, фронты и временные характеристики следования импульсов, и после преобразования в оптическую форму передают дальше правильный усиленный сигнал, в том же виде, в каком он был на выходе предыдущего регенератора. Хотя такие системы регенерации работают хорошо, они являются весьма дорогими и, будучи установленными, не могут наращивать пропускную способность линии.

На основе EDFA потери мощности в линии преодолеваются путем оптического усиления (рис. 8.3 б). В отличие от регенераторов, такое "прозрачное" усиление не привязано к битовой скорости сигнала, что позволяет передавать информацию на более высоких скоростях и наращивать пропускную способность до тех пор, пока не вступают в силу другие ограничивающие факторы, такие как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия. Усилители EDFA также способны усиливать многоканальный WDM сигнал, добавляя еще одно измерение в пропускную емкость.

Хотя оптический сигнал, генерируемый исходным лазерным передатчиком, имеет вполне определенную поляризацию, все остальные узлы на пути следования оптического сигнала, включая оптический приемник, должны проявлять слабую зависимость своих параметров от направления поляризации. В этом смысле оптические усилители EDFA, характеризуясь слабой поляризационной зависимостью коэффициента усиления, имеют ощутимое преимущество перед полупроводниковыми усилителями.

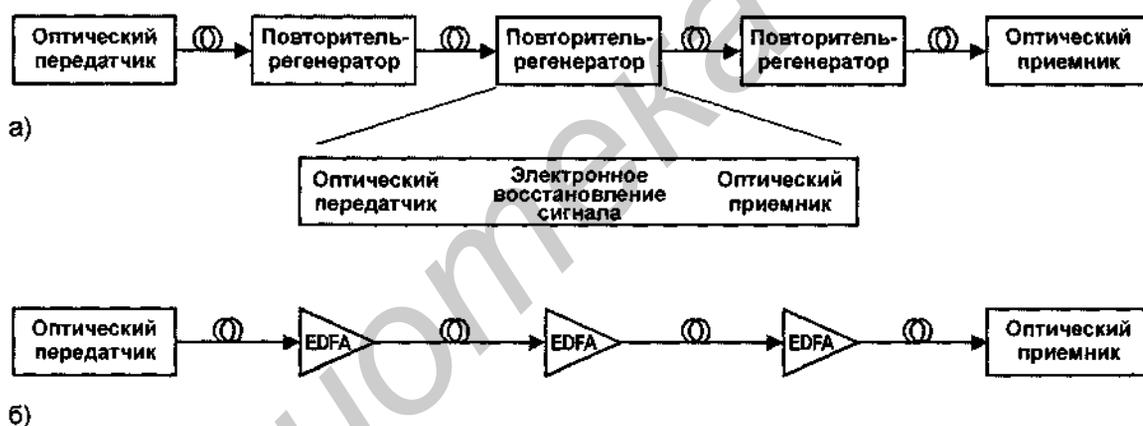


Рис. 8.3. Оптические системы связи на основе: а) каскада регенерационных повторителей; б) каскада оптических усилителей EDFA

В отличие от регенераторов, оптические усилители вносят дополнительный шум, который необходимо учитывать. Поэтому, наряду с коэффициентом усиления, одним из важных параметров EDFA является коэффициент шума.

Технические параметры усилителей EDFA

Ниже определяются ключевые параметры, характеризующие EDFA: мощность насыщения, коэффициент усиления, мощность усиленного спонтанного излучения и шум-фактор.

Мощность насыщения $P_{out\ sat}$ (saturation output power) – определяет максимальную выходную мощность усилителя. Большее значение мощности позволяет увеличивать расстояние

безретрансляционного участка. Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя. У мощных EDFA он может превосходить 36 дБм (4 Вт).

Коэффициент усиления G (gain) определяется из соотношения

$$G = P_{S_{out}} / P_{S_{in}}, \quad (8-1)$$

где $P_{S_{in}}$ и $P_{S_{out}}$ – мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя, а логарифмический эквивалент определяется по формуле $g = 10 \lg G$ (дБ). Величина коэффициента усиления зависит от входной мощности и стремится к своему максимальному пределу по мере уменьшения мощности входного сигнала. Например, для лазеров EAU-200/350, выпускаемых IRE POLUSE-GROUP, предельное значение коэффициента усиления составляет 42 дБ (табл. 8.4).

Мощность усиленного спонтанного излучения ASE (amplified spontaneous emission). В отсутствие входного сигнала EDFA является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением (рис. 8.4). Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается сигнал от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием сигнала от лазера, усиливая входной сигнал. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE (рис. 8.4). При подаче на вход мультиплексного сигнала происходит дальнейший отток мощности от ASE в пользу усиливаемых мультиплексных каналов. Обычно усилители работают в режиме насыщения по отношению к сигналу на выходе. Это создает естественное выравнивание уровней сигналов в каналах, что крайне желательно, особенно для протяженных линий с большим числом последовательных усилителей. Если лазер, предшествующий усилителю, генерирует излучение в спектральном окне $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$, где c – скорость света), и фильтр в приемном

оптоэлектронном модуле пропускает сигнал соответственно в этом же окне, то вклад в мощность шума на выходе благодаря усиленному спонтанному излучению будет равен $ASE_{\Delta\nu} = ASE \cdot \Delta\nu$. Таким образом, оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в спектральном отношении отдельными каналами. Использование непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем узкополосных фильтров, настроенных на рабочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

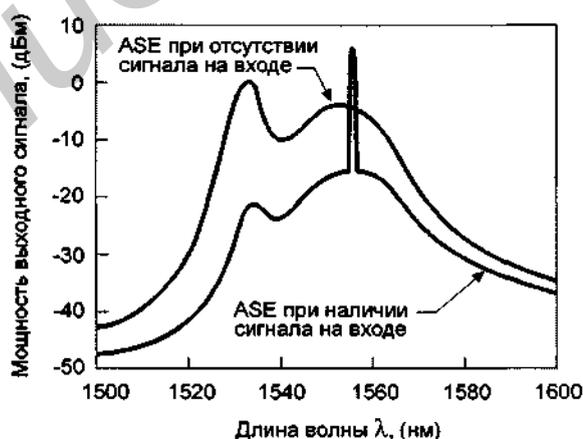


Рис. 8.4. Выходной спектр EDFA, снятый спектральным анализатором (ASE – спектральная плотность шума)

Большие собственные временные постоянные EDFA – постоянная времени перехода в метастабильное состояние ~1 мкс, время жизни метастабильного состояния ~10 мкс [9] – устраняют кросс-модуляцию ASE в усилителе и делают более стабильной работу каскада оптических усилителей. Мощность усиленного спонтанного излучения связана с коэффициентом усиления формулой [10]

$$ASE = hv \cdot \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (8-2)$$

где h – постоянная планка, равная $6,6252 \times 10^{-34}$ Вт·с², ν – частота (Гц), соответствующая длине волны λ из диапазона 1530-1560 нм ($\nu = c/\lambda$, c – скорость света, равная $2,9979 \times 10^8$ м/с), n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, η – квантовая эффективность. В идеальном случае $n_{sp} = \eta = 1$ при $G \gg 1$, отнесенная ко входу мощность усиленного спонтанного излучения идеального квантового усилителя ASE_{id}/G просто равна hv , что при $\lambda = 1550$ нм составляет $1,28 \times 10^{-19}$ Вт/Гц в расчете на спектральную полосу 1 Гц. Размору окна анализатора в 0,8 нм соответствует спектральное окно в 100 ГГц, что определяет приведенную к входу величину эффективной мощности усиленного спонтанного излучения $1,28 \times 10^{-8}$ Вт или -48,9 дБм).

Шум-фактор NF (noise figure) определяется как отношение сигнал/шум на входе (SNR_{in}) к отношению сигнал/шум на выходе (SNR_{out}):

$$NF = \frac{P_{S_{in}}}{P_{N_{in}}} \bigg/ \frac{P_{S_{out}}}{P_{N_{out}}}. \quad (8-3)$$

Важно отметить, что мощность шума на входе является квантово-ограниченной минимальной величиной и определяется нулевыми флуктуациями вакуума $P_{N_{in}} = hv \cdot \Delta\nu$. Мощность шума на выходе состоит из суммы мощности усиленного спонтанного излучения $ASE_{\Delta\nu}$ и мощности шума нулевых флуктуаций вакуума, которые проходят через усилитель без изменения: $P_{N_{out}} = ASE_{\Delta\nu} + hv \cdot \Delta\nu$. Если учесть, что $P_{S_{out}}/P_{S_{in}} = G$, то шум-фактор можно выразить через коэффициент усиления и мощность усиленного спонтанного излучения:

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{ASE}{hv} \right). \quad (8-4)$$

Часто при описании EDFA значение шум-фактора указывается в дБ: $nf = 10 \lg NF$. Минимальный шум-фактор равен 1 (0 дБ) и достигается при $n_{sp}/\eta = 1$ или при $G = 1$. Это означает, что усилитель вносит минимальный шум, равный шуму идеального оптического усилителя. На практике сразу на 3 дБ ($10 \lg 2$) необходимо увеличить nf , так как существует два направления поляризации (две моды), в связи с чем $n_{sp} = 2$, а типичные значения составляют 5,5 дБ.

Чем ближе к 1 значение шум-фактора, тем меньше дополнительный шум вносит усилитель. В то же время при использовании каскада из нескольких усилителей полный шум-фактор возрастает. Найдем полный шум-фактор NF двух усилителей, характеризующихся соответственно усилением G_1 и G_2 и шум-факторами NF_1 и NF_2 . Шум на выходе после двух каскадов записывается в виде

$$P_{N_{out}} = hv\Delta\nu \cdot [NF_1 G_1 G_2 + (NF_2 - 1)G_2], \quad (8-5)$$

где учтен квантовый шум вакуума, который возникает только на выходе цепочки усилителей, а сигнал на выходе

$$P_{S_{out}} = G_1 G_2 P_{S_{in}}, \quad (8-6)$$

откуда полный шум-фактор равен

$$NF = NF_1 + (NF_2 - 1)/G_1 . \quad (8-7)$$

Лучший способ получения устройства с низкошумящими характеристиками, как и в случае радиочастотных усилителей, состоит в использовании низкошумящего усилителя с большим усилением в первом каскаде и шумящего усилителя высокой мощности во втором каскаде. Первый каскад определяет также шумовую характеристику многокаскадного усилителя.

Измерение шум-фактора основывается на использовании формулы (8-4), где G и ASE определяются экспериментально. На рис. 8.5 показана схема экспериментальной установки [11].

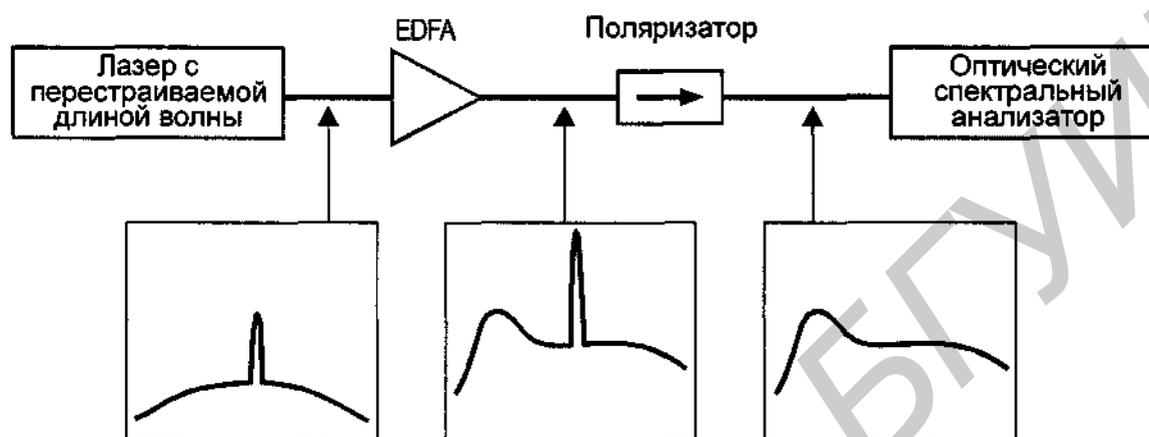


Рис. 8.5. Схема экспериментального измерения коэффициента шума EDFA

Практическое значение имеет мощность усиленного спонтанного излучения, когда на вход EDFA подается полезный сигнал. Поэтому, измерять ASE следует именно при наличии такого сигнала. Анализатором измеряется мощность в окне $\Delta\nu$ (например, 100 МГц, 50 МГц или меньше) и приводится к 1 Гц. Поскольку выходной сигнал – линейно поляризован (поляризация его совпадает с поляризацией сигнала на входе от лазера), то поляризатор может полностью устранить эту компоненту полезного сигнала, пропуская шум ASE_{\perp} только с нормальной поляризацией, которая измеряется экспериментально (первое измерение). Шум в отличие от полезного сигнала – не поляризован, т. е. $ASE_{\parallel} = ASE_{\perp}$. Полный шум $ASE = ASE_{\parallel} + ASE_{\perp} = 2ASE_{\perp}$ учитывает вклады от двух нормальных поляризаций. Полезный сигнал вычисляется по формуле $P_{out} = P_{tot} - ASE_{\perp} \cdot \Delta\nu$. Измерение P_{tot} – полного выходного сигнала – происходит, когда ось поляризатора совпадает с направлением линейной поляризации полезного сигнала (второе измерение). Затем при помощи анализатора непосредственно измеряется мощность сигнала на входе P_{in} , то есть сигнал в отсутствии усилителя (третье измерение). Теперь по формуле (8-4) можно определить коэффициент усиления G .

Для примера в табл. 8.4 приведены технические характеристики двух промышленных моделей оптических усилителей EDFA, выпускаемых институтом Радиоэлектроники РАН (г. Фрязино) совместно с зарубежными компаниями IPG Laser, IP Fibre Devices и IPC – группа IRE-POLUS [12].

Таблица 8.4. Технические характеристики моделей EDFA EAU-200 и EAU-350 [12]

Параметры	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение
Область применения	Аналоговые и цифровые оптические распределенные сети, системы DWDM		
Оптические характеристики			
Зона усиления, нм	1530		1570
Мощность насыщения $P_{out\ sat}$ при ($P_{in} = -3$ дБм), дБм: EAU-200 EAU-350		23,0 25,5	23,5 26,0
Коэффициент усиления g при малом входном сигнале, дБ ($\lambda = 1545$ нм)	42		
Неравномерность коэффициента усиления Δg в диапазоне 1553-1567 нм ($P_{in} = -3$ дБм), дБ			$\pm 0,3$
Поляризационная чувствительность насыщенного входного сигнала, дБ			0,2
Максимальные значения коэффициент шума nf в диапазоне 1545-1565 нм, дБ при $P_{in} = -4$ дБм при $P_{in} = +4$ дБм			5,5 6,0
Поляризационная модовая дисперсия, пс			0,2
Оптическая изоляция вход/выход, дБ	50		
Характеристики физических интерфейсов входа/выхода			
Тип входного/выходного волокна	SMF-28™		
Тип оптических соединителей	FC/PC, FC/SPC, FC/APC		
Длина pig-tail-a, м	1,5		
Параметры лазера накачки			
Номинальная длина волны накачки, нм	965		
Полоса накачки, мкм	1x100		
Время наработки на отказ, час	500000		1000000
Электрические характеристики			
Рабочее напряжение, В (постоянный ток)	5		7
Потребляемая мощность при 20 °С, Вт			12
Общие характеристики			
Рабочий диапазон температур, °С	-30		+65
Температура хранения, °С	-30		+80
Время прогрева до полной стабилизации, мин.			3
Влажность, %	0		95
Размеры, мм	115x21x165		
Вес, кг	0,3		
Другие требования и характеристики	Удовлетворяет стандарту Bellcore		

Классификация усилителей EDFA по способам применения

В зависимости от применения, различают предварительные усилители, линейные усилители и усилители мощности, (рис. 8.6).

Предварительные усилители (предусилители) устанавливаются непосредственно перед приемником регенератора и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на выходе электронного каскада усиления в оптоэлектронном приемнике. Оптические предусилители

часто используются в качестве замены сложных и обычно дорогих когерентных оптических приемников.

Линейные усилители устанавливаются в промежуточных точках протяженных линий связи между регенераторами или на выходе оптических разветвителей с целью компенсации ослабления сигнала, которое происходит из-за затухания в оптическом волокне или из-за разветвления в оптических разветвителях, ответвителях, мультиплексорах WDM. Линейные усилители заменяют оптоэлектронные повторители и регенераторы в тех случаях, когда нет необходимости в точном восстановлении сигнала.

Усилители мощности (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков и предназначены для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем, например, при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных системах кабельного телевидения.



Рис. 8.6. Применение разных типов оптических усилителей

В табл. 8.5 указана степень значимости параметров EDFA в зависимости от типа усилителя.

Таблица 8.5. Сравнительный анализ параметров трех типов EDFA

Параметр	Предусилитель	Линейный усилитель	Усилитель мощности
Коэффициент усиления G	высокий *	средний	низкий
Коэффициент шума NF	низкий	средний *	низкий
Мощность насыщения $P_{out\ sat}$	низкая	средняя	высокая *
Нелинейность **	низкая	низкая	низкая
Зона усиления	узкая	широкая	широкая
Отклонение от плато ΔG	не указывается	высокая линейность	высокая линейность

* указан наиболее значимый параметр;

** нелинейность охватывает совокупность характеристик: зависимость G от P_{in} , поляризационную чувствительность, PMD усилителя, поперечные помехи между каналами

Расчет числа каскадов линейных усилителей EDFA

На рис. 8.7 показана типовая диаграмма мощности сигнала в процессе распространения, а также процесс накопления шума в линии из каскада усилителей EDFA. Каждый усилитель осуществляет усиление сигнала (коэффициент усиления $g(\lambda)$ (дБ) и вносит определенный уровень шума $N_0(\lambda)$ (Вт). Далее будем пренебрегать мощностью шума нулевых флуктуаций.

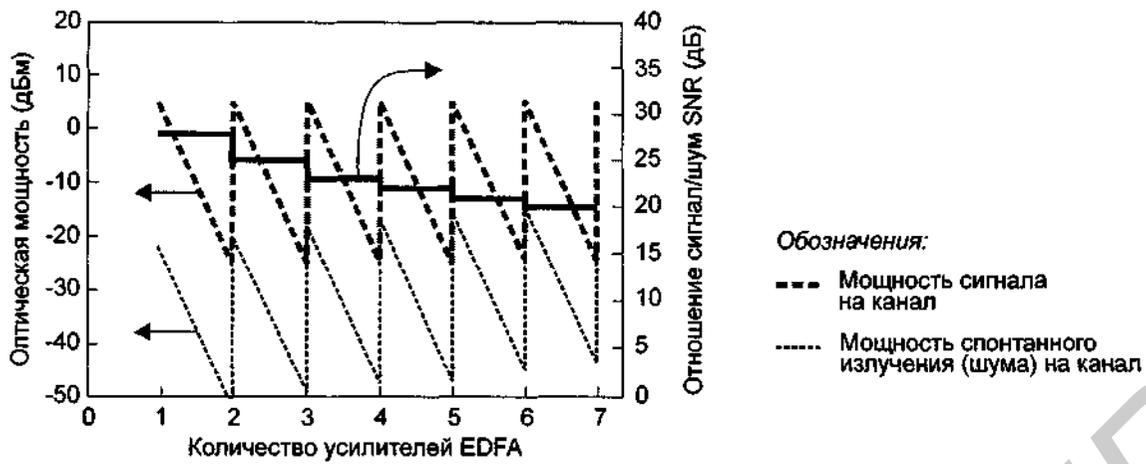


Рис. 8.7. Диаграммы мощности в межрегенерационной линии с каскадом усилителей EDFA

Обозначим удельное затухание в волокне α (дБ/км), тогда полное затухание на длине L (км) сегмента между EDFA составляет αL . Ниже приведены основные соотношения, описывающие процессы затухания в линии и усиление на EDFA для полезного сигнала и шума:

$$\alpha L = 10 \lg(P_{out\ i-1} / P_{in\ i}), \quad g = 10 \lg(P_{out\ i} / P_{in\ i}), \quad (8-8) / (8-9)$$

$$\alpha L = 10 \lg(N_{out\ i-1} / N_{in\ i}), \quad g = 10 \lg\left(\frac{N_{out\ i} - N_0}{N_{in\ i}}\right), \quad (8-10) / (8-11)$$

где введены обозначения $P_{in\ i}$, $P_{out\ i}$, $N_{in\ i}$, $N_{out\ i}$ соответственно для мощности входного и выходного сигнала, а также входного и выходного шума по отношению к усилителю i . Оптические усилители характеризуются определенной мощностью насыщения выходного сигнала $P_{out\ sat}$. Эффективная работа усилителя достигается при таком входном сигнале, когда выходной сигнал сравним с мощностью насыщения (обычно немного превосходит мощность насыщения) – при меньшем уровне входного сигнала возрастает удельный вес постоянной составляющей вносимого шума, а при большем уровне входного сигнала (следовательно, и входного шума) происходит усиление только шума. Таким образом, в идеально сбалансированной линии из каскада усилителей $P_{out\ i-1} = P_{out\ i} = P_{out\ sat}$. Отсюда $\alpha L = g$. Тогда, приравнявая соотношения (8-10) и (8-11), получаем $N_{out\ i} = N_{out\ i-1} + N_0$. Пренебрегая уровнем шума $N_{out\ 0}$ в выходном сигнале от стартового регенератора, т.е. положив $N_{out\ 0} = 0$, для отношения сигнал/шум на выходе k -го усилителя находим: $snr_k = 10 \lg(P_{out\ sat} / N_{out\ k}) = 10 \lg(P_{out\ sat} / kN_0)$ дБ. И окончательно, если мощность сигнала и шума указана в дБм, запишем это соотношение в виде:

$$snr_k = p_{out\ sat} - n_{out} - 10 \lg k \text{ (дБ)}, \quad (8-12)$$

где $n_{out} = 10 \lg N_{out} = n_{out\ id\ \Delta v} + nf = -134,1 + 10 \lg \Delta v + g + nf$ (дБм), значение Δv нужно подставлять в Гц.

Как видно из (8-12), SNR падает с ростом числа каскадов EDFA. Допустимая величина SNR сильно зависит от сетевого/телекоммуникационного стандарта. По этой причине выбор оптических усилителей с теми или иными параметрами, равно как и расчет максимального числа усилителей в межрегенерационной линии и максимальной протяженности сегментов, должны проводиться строго в соответствии с планируемым сетевым приложением. Например, если в мультиплексных каналах одновременно будут использоваться сетевые стандарты:

ATM/STM-1, ATM/STM-4, Gigabit Ethernet, STM-16, то достаточно удовлетворить самому жесткому требованию на SNR, из них, в данном случае, это – STM-16.

8.4. Оптимизация WDM/TDM

В настоящее время налаживается индустриальное производство мультиплексных систем синхронной цифровой иерархии SDH со скоростями передачи на канал 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с. В этой связи интересно сравнить два решения одинаковой пропускной способности 80 ГГц на основе систем, мультиплексирующих соответственно 32 канала STM-16 и 8 каналов STM-64.

При одном недостатке – невозможности дальнейшего наращивания – система 32 x STM-16 имеет ряд преимуществ перед системой 8 x STM-64:

- бóльшая протяженность линии;
- более гибкие возможности по наращиванию и наличие разнообразных трибных интерфейсов (1,5/2/6/8/34/45/140 Мбит/с);
- большее разнообразие среди существующих SDH архитектур;
- проще миграция к оптическому уровню.

Протяженность линии

Соотношение сигнал/шум. В табл. 8.6 приведены основные параметры оптических спецификаций для стандартов STM-16 и STM-64. Как видно, система STM-64 предъявляет более высокие требования к соотношению сигнал/шум, превышая на 5-10 дБ этот параметр для STM-16, что ведет к меньшему допустимому числу усилителей EDFA между регенераторами STM-64.

Таблица 8.6. Основные параметры оптических спецификаций стандартов STM-16 и STM-64 [13]

Параметры	STM-16 (2,5 Гбит/с)	STM-64 (10 Гбит/с)
Минимальное отношение сигнал/шум, дБ	18-21	27-31
Допустимая дисперсия в кабельной системе, пс/нм	10500	1600
Ограничения из-за PMD	нет	< 400 км

Хроматическая дисперсия. STM-16 допускает значительно большую дисперсию сигнала в линии, чем STM-64, что дает выигрыш как в протяженности сегментов между последовательными оптическими усилителями, так и в общей протяженности линии между регенераторами. Ограничения на длину, возникающие из-за хроматической дисперсии, показаны в табл. 8.7 (для волокон SF и NZDSF взяты значения удельной дисперсии 20 и 5,5 пс/(нм·км), соответственно). Благодаря линейности хроматической дисперсии, можно добиться значительного увеличения длин, указанных в таблице, используя вставки фрагментов ВОК на основе волокна с компенсирующей дисперсией.

Таблица 8.7. Ограничение общей протяженности из-за влияния хроматической дисперсии

Тип волокна	STM-16	STM-64
Стандартное одномодовое волокно SF, км	525	80
Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF, км	1909	291

Поляризационная модовая дисперсия. Проведем оценки влияния PMD на передачу каналов STM-16 и STM-64. В рамках промышленных требований, PMD не должна превышать 1/10 битового интервала. Отсюда значения накопленной поляризационной модовой дисперсии не должны превышать 40 пс и 10 пс для линий STM-16 и STM-64 соответственно. Величина PMD по прохождению светом длины L определяется по формуле $\tau_{pmd}(L) = T \cdot \sqrt{L}$, где T – удельная поляризационная модовая дисперсия. При $T = 0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ (для волокон NZDSF –

TrueWave™ и SMF-LS™, см. табл. 2.7, гл. 2) получаем для линий STM-16 и STM-64 предельные протяженности между регенераторами 6400 км и 400 км соответственно. Первое ограничение так велико, что дело до него не доходит. Заметим, что в отличие от хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия не компенсируется. Поэтому уменьшить этот параметр можно только используя новые волокна, например NZDSF – LEAF™, для которого $T \leq 0,08 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$.

На рис. 8.8 приведены гипотетические архитектуры линий для систем 32 x STM-16 и 8 x STM-64, имеющих одну и ту же полную длину 496 км. Как видно, в случае 32 x STM-16 связь между двумя регенераторами можно построить только на основе линейных оптических усилителей. В случае 8 x STM-64 требуется установить еще два промежуточных регенератора, вдобавок к этому сокращаются длины сегментов между усилителями EDFA.

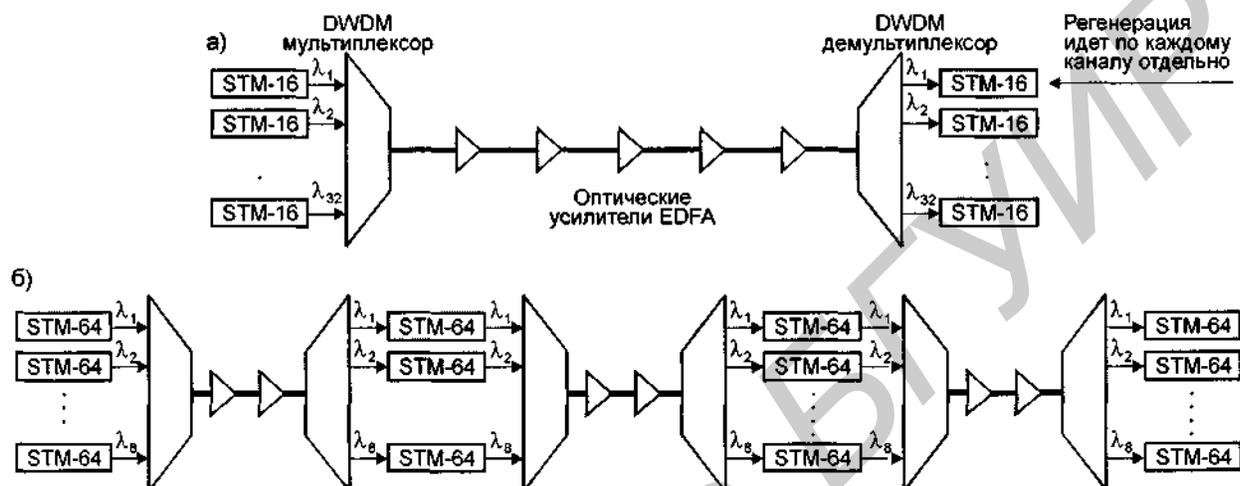


Рис. 8.8. Гипотетические архитектуры мультиплексных оптических линий на основе каналов SDH длиной 496 км: а) система 32 x STM-16; б) система 8 x STM-64

Трибные интерфейсы

Хотя волокно обеспечивает огромную полосу пропускания, каналы доступа обычно рассчитаны на меньшую скорость. Терминалы STM-64 разработаны для создания стержневых магистралей и допускают подключение менее скоростных потоков синхронной цифровой иерархии только двух типов: STM-4 и STM-16. В случае необходимости организации доступа по менее скоростным каналам, например на основе STM-1 или на основе трибных интерфейсов плезиохронной иерархии E1, E2, E3 и т. д., наряду с терминалом STM-64 потребуется дополнительный отдельный сетевой элемент, который будет связываться с терминалом STM-64 по каналу STM-4 или STM-16. В то же время сетевые элементы на каналы STM-16 и более низкие допускают реализацию прямого доступа.

Таблица 8.8. Допустимые низкоскоростные интерфейсы для терминалов STM-16 и STM-64

Интерфейсы	STM-16	STM-64 (9953,280 Мбит/с)
Возможность ввода/вывода каналов	Да	Нет
STM-16 (2488,320 Мбит/с)	-	Да
STM-4 (622,488 Мбит/с)	Да	Да
STM-1 (155,520 Мбит/с)	Да	Нет
E3 (34,368 Мбит/с)	Да	Нет
E1 (2,048 Мбит/с)	Да	Нет

Существующие архитектуры SDH

Сетевые элементы архитектуры STM-64 пока еще не настолько развиты, чтобы органично дополнить меньший масштаб иерархии STM-16. В Release 1.0 STM-64, в частности не включена такая возможность, как формирование архитектуры с кольцевой топологией. Именно большое разнообразие кольцевых архитектур (от одно-волоконного кольца до 4-волоконного двойного кольца) является одной из наиболее сильных сторон STM-16. Заметим, что использование волнового мультиплексирования позволяет строить смешанные архитектуры на основе кольцевой и линейной топологий в одном и том же волокне.

Release 1.0 STM-64 допускает развертывание исключительно линейных систем.

Миграция к оптическому уровню

Поскольку трудно предсказывать потребности в сетях и в полосе пропускания, то преимущества будут иметь те архитектуры, которые допускают более плавное наращивание своих ресурсов в более широких пределах. Развертывание системы 8 x STM-64 имеет большой шаг в 10 Гбит/с, в то время, как система 32 x STM-16 может наращиваться более плавно с шагом 2,5 Гбит/с. Кроме этого, сегментирование трафика в большее число волновых каналов – WDM-мультиплексирование и последующая их полностью оптическая кросс-коммутиция, а также ввод-вывод – представляется более простым решением, чем предварительное электронное агрегирование потоков STM-16 в меньшее число потоков STM-64 на терминале SDH.

8.5. Оптические коммутаторы

Оптическая коммутация принципиально отличается от механической коммутации потоков, которая была рассмотрена в п.3.6. При механической коммутации время срабатывания составляет десятки мс (в среднем от 20 до 50 мс). При оптической коммутации время срабатывания определяется переходными процессами в электрической цепи управления оптического коммутатора и обычно на несколько порядков меньше.

Оптический коммутатор – это один из наиболее важных элементов полностью оптической сети, без которого невозможно строить масштабируемые архитектуры. Большинство основных конструкций оптических коммутаторов должно иметь, по крайней мере, два выхода. Основными параметрами коммутатора являются: перекрестные помехи, вносимые помехи, скорость переключения, управляющее напряжение. В настоящее время используются разнообразные типы оптических коммутаторов – направленные ответвители, мостовой балансировый интерферометр и коммутатор на скрещивающихся волноводах. В основе работы оптического коммутатора используется линейный электрооптический эффект Поккельса (Pockels), который заключается в изменении показателя преломления материала пропорционально напряженности приложенного электрического поля. Эффект Поккельса может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии.

Устройства мультиплексирования/демультиплексирования WDM, волновые фильтры и оптические коммутаторы имеют одну общую деталь – в основе их работы лежат в той или иной степени интерференционные эффекты. Основные принципы работы легче рассмотреть на простейшем четырехполюснике – разветвителе-коммутаторе.

Разветвитель-коммутатор 2x2 (элемент 2x2)

Общая схема сплавного разветвителя X-типа показана на рис. 8.9 а. Излучение, введенное в один волновод, проникает в другой за счет перекрытия реактивных полей двух волноводов. Погонный коэффициент связи k зависит от параметров волновода, длины волны λ и ширины зазора g между волноводами. Разветвитель характеризуется разностью постоянных распространения двух волноводов $\Delta\beta = 2\pi(N_1 - N_2)/\lambda$, (где N – эффективные показатели преломления) и длиной L . Прикладывая электрическое напряжение к электродам, расположенным по бокам или сверху и снизу волноводов, образующих так называемую ячейку Поккельса, можно регулировать фазовую расстройку за счет линейного электрооптического эффекта.

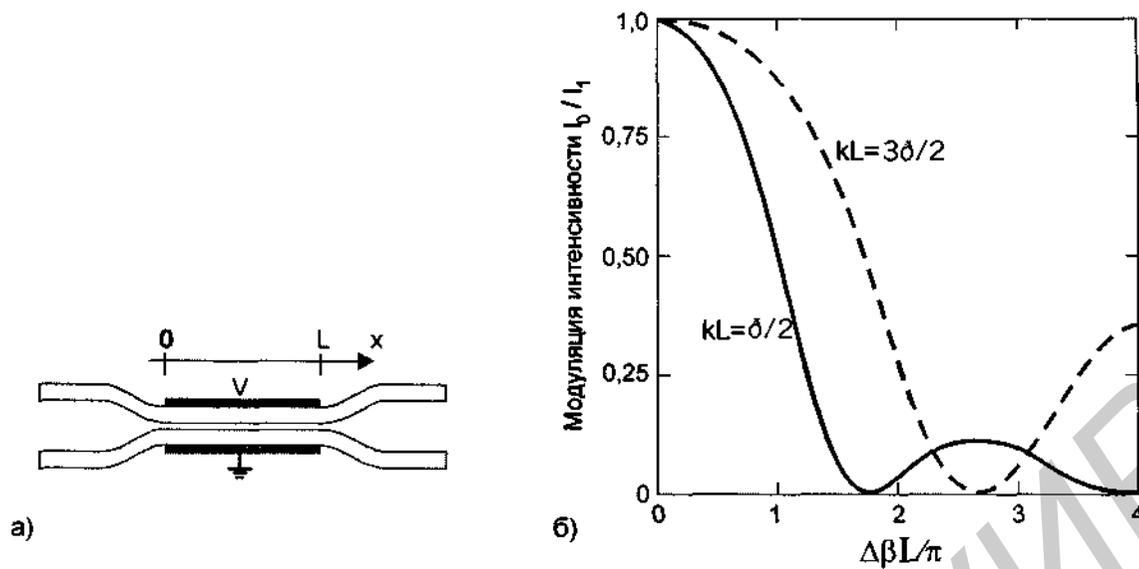


Рис. 8.9. Общая схема и характеристика направленного ответвителя
 а) направленный ответвитель-переключатель; б) модуляционная характеристика направленного ответвителя, действующего как переключатель

Далее следует решить систему двух комплексных дифференциальных уравнений, описывающих взаимосвязанные моды [10]:

$$iR' = -\delta R + kS, \quad iS' = \delta S + kR, \quad (8-13)/(8-14)$$

где $\delta = \Delta\beta/2$, R и S – комплексные амплитуды волн в двух волноводах, штрих – означает производную по x . В частном случае, когда только в один волновод вводится единичная мощность, т. е. $R(0) = 1, S(0) = 0$, можно, решая уравнения (8-13) и (8-14), определить мощность, переданную в другой волновод, т. е. величину $|S(L)|^2$, которая также носит название эффективности передачи:

$$\eta = \frac{1}{1 + (\delta/k)^2} \sin^2 kL [1 + (\delta/k)^2]^{1/2} \quad (8-15)$$

В случае полностью симметричной конструкции на основе двух одинаковых волноводов (рис. 8.9 а) в отсутствии напряжения ($\delta = 0$) мы имеем $\eta = \sin^2 kL$. Полная передача мощности происходит при $kL = (2n + 1)\pi/2$, где n – целое число, и минимальная длина при этом будет определяться выражением $L = \pi/2k$. В силу полной линейности и однородности системы уравнений (8-13) и (8-14), любая линейная комбинация двух решений также будет решением. Добавляя свойство симметрии, получаем, что при условиях ($\delta = 0$ и $L = \pi/2k$), полная (кроссовая) передача мощности будет иметь место для обоих сигналов, входящих в каждый волновод – сигналы должны быть одной и той же длины волны, а именно той, для которой рассчитывался коэффициент передачи k , и, соответственно, длина участка взаимодействия L . Заметим, что при $\delta \neq 0$ полная передача мощности невозможна ни при каких значениях kL .

Параллельное прохождение ($\eta = 0$) можно обеспечить за счет подачи электрического потенциала, вводя фазовую расстройку $\Delta\beta$. Легко определить величину необходимой расстройки $\Delta\beta = \sqrt{3}\pi/L$. В отсутствии напряжения эффективность связи между волноводами коммутатора составляет 100% (оптические сигналы полностью кроссируются – входят в один волновод, выходят из другого), а при подаче необходимого напряжения эффективность связи уменьшается до 0. Поскольку уравнения (8-13) и (8-14) линейны по обоим аргументам и од-

нородны, то суперпозиция любых двух, являющихся по отдельности решениями, также будет решением. Таким образом, разветвитель-коммутатор 2×2 осуществляет коммутацию без блокировки.

Еще одна реализация разветвителя-коммутатора 2×2 , состоящая из двух последовательных X-разветвителей, представлена на рис. 8.10. Оптические сигналы после прохождения по разным плечам интерферируют во втором разветвителе. Путем изменения напряжения на электродах, охватывающих одно из плеч, можно регулировать разность фаз между приходящими во второй разветвитель сигналами и тем самым влиять на характер интерференции.

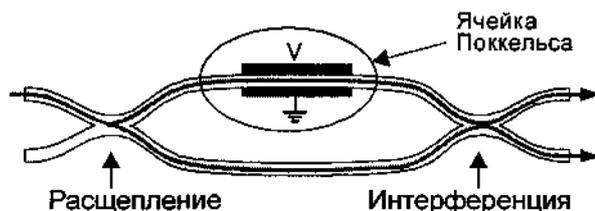


Рис. 8.10. Двухплечевой оптической разветвитель-коммутатор

Наряду с электрооптическим эффектом, для осуществления коммутации также широко используется акустооптический эффект, который рассмотрен в работах [14, 15].

Имеется ряд технических реализаций пространственных коммутаторов 2×2 на основе полупроводниковых оптических усилителей. Описание таких устройств, а также более сложных производных устройств для создания временных задержек приводится в работах [16, 17].

Оптические коммутаторы $n \times n$

На основе простых оптических разветвителей-коммутаторов 2×2 -элементов – строятся более сложные оптические коммутаторы $n \times n$. Поскольку составные элементы 2×2 принимают на входные полюсы сигналы одной и той же длины волны, то и весь коммутатор $n \times n$ изготавливается для работы с поступающими оптическими сигналами одной и той же заданной длины волны. Другими важными характеристиками коммутатора, кроме рабочей длины, являются максимальные вносимые потери и поперечные помехи на выходных полюсах. Прежде чем приступить к рассмотрению общих вопросов построения оптических коммутаторов $n \times n$ и их особенностей, проанализируем работу некоторых простых моделей (рис. 8.11).

Матричный строго неблокирующий коммутатор 4×4 (рис. 8.11 а) с 16 элементами представляет частный случай более общего матричного коммутатора. Заметим, что число элементов между разными парами входных и выходных полюсов может меняться в пределах от минимального 1 (элемент 1.1) до максимального 7 (элементы 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 3.4, 2.4, 1.4). Если учесть, что по прохождению каждого элемента теряется доля мощности полезного сигнала, а также вносится шум, то в заведомо неравном положении оказываются различные пути, с малым и большим числом промежуточных элементов. Соединение между любым входным и выходным полюсом всегда можно установить независимо от того, как скоммутированы оставшиеся пары полюсов, и не влияя на их соединение (свойство строгой неблокируемости коммутатора). Путь соединения однозначно определяется входным и выходным полюсами.

Коммутатор 4×4 (рис. 8.11 б) с 6 элементами представляет перестраиваемый неблокирующий коммутатор. Хотя число элементов в этом коммутаторе значительно меньше, чем в матричном 4×4 , он позволяет всегда без блокировки установить 4 соединения для заранее заданных пар входных-выходных полюсов (1-i), (2-j), (3-k), (4-l), где выходные полюсы (i, j, k, l) представляют любую перестановку (1, 2, 3, 4). Рассмотрим теперь процесс последовательного установления пар соединений. Пусть сначала было установлено соединение $vx.1-vых.1$ (1-1.1-1.2-1.3-1), затем соединение между $vx.2$ и $вых.2$ – это соединение устанавливается единственным путем (2-1.1-2.2-1.3-2), и, наконец, соединения (4-2.1-2.2-2.3-4) и (3-2.1-1.2-2.3-3). Пусть далее происходит разрыв соединений $vx.1-vых.1$ и $vx.4-vых.4$, т. е. порты $vx.1, 4$ и $вых. 1, 4$ становятся свободными (остальные соединения продолжают действовать). И теперь, видно, что установление соединения полюсов $vx.1$ и $вых.4$ невозможно из-за блокиров-

ки Блокировку можно снять только путем дополнительной реконструкции уже действующих соединений.

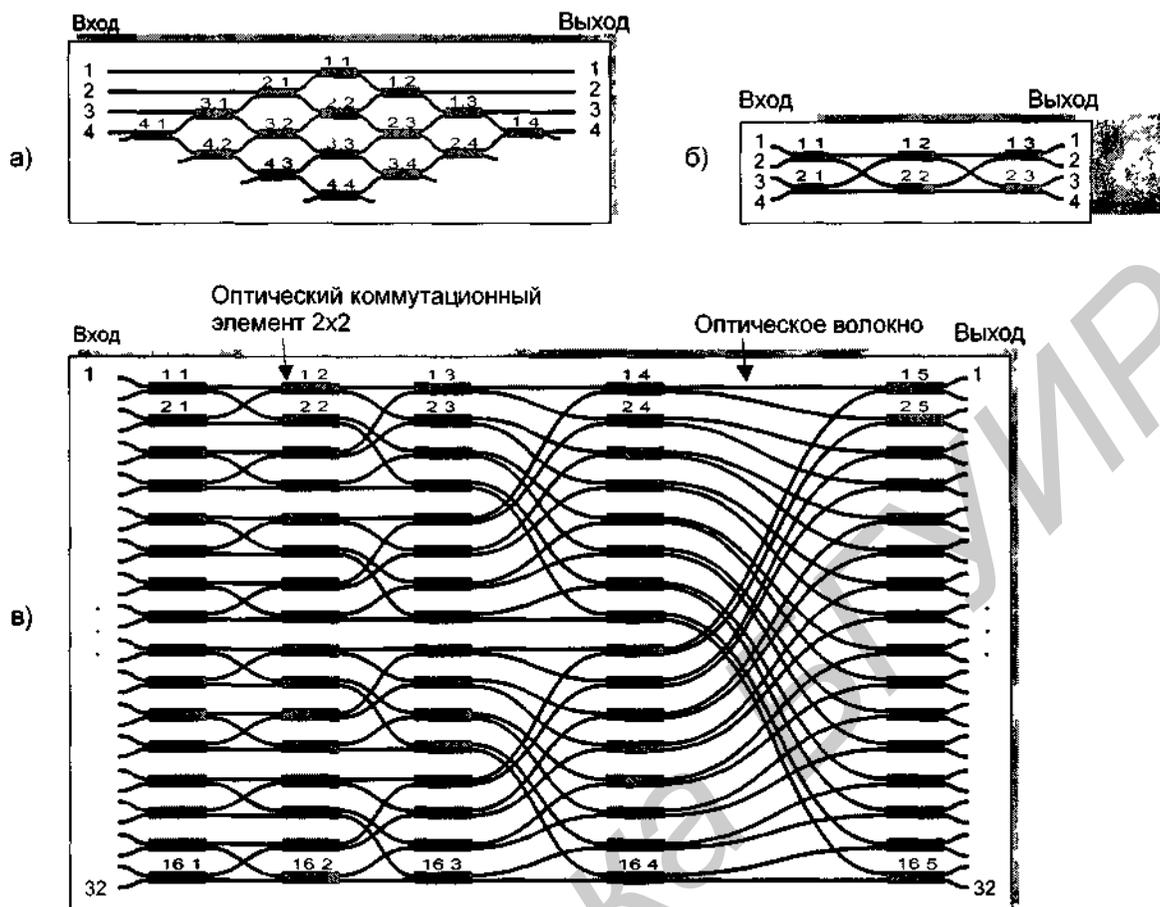


Рис. 8.11. Модели оптических коммутаторов: а) матричный коммутатор 4x4 (строго неблокирующий коммутатор, 16 элементов); б) коммутатор 4x4 (перестраиваемый неблокирующий коммутатор, 6 элементов); в) Delta коммутатор 32x32 (блокирующий, 90 элементов)

Коммутатор 32x32 (рис. 8.11 б) с 90 элементами представляет блокирующий коммутатор типа Delta. В этом коммутаторе можно установить соединение между любым входным и выходным полюсами. Однако в случае попытки установления множественных соединений возможны блокировки, которые в принципе невозможно устранить. Например, нельзя одновременно передать сигналы, приходящие на полюсы 1, 2 и выходящие через полюсы 31, 32. Блокировка распространяемых сигналов возникает уже на участке связи между элементами 1.1 и 2.2.

Сведения из теории коммутации и общий анализ некоторых коммутаторов

Элементом 2x2 (обозначение $X_{2,2}$), будем называть четырехполюсник с двумя входами а, b и двумя выходами с, d, который может находиться в одном из двух состояний: либо с соединениями а-с, b-d, либо с соединениями а-d, b-с. Коммутатором $n \times n$ будем обозначать граф, узлами которого являются элементы 2x2, имеющий n входов и n выходов, причем для любого входного и выходного полюсов можно построить соединение, проходящее через соответствующие элементы коммутатора. Обозначим через n_c и n_L соответственно полное

число элементов коммутатора и максимальное число элементов на пути между входным и выходным полюсами.

Коммутатор называется *строго неблокирующим* (strictly non-blocking), если для любой свободной пары входных-выходных полюсов (i, k) и при любых предварительно установленных соединениях других пар полюсов всегда можно построить соединение $i-k$, не перестраивая (не разрывая) уже существующие соединения.

Примером строго неблокирующего коммутатора является матричный коммутатор $n \times n$, у которого $n_c = n^2$ и $n_L = 2n - 1$ (рис. 8.12, табл. 8.9). Свойство строгой неблокируемости считается одним из наиболее важных при оптической коммутации. Дело в том, что процедура избежания блокировки путем предварительного помещения в буфер ячейки или кадра, как это делается в традиционных системах электронной коммутации, весьма затруднительна в полностью оптических сетях. Матричным коммутатором $n \times n$ легко управлять, например если считать, что в отсутствии напряжения все элементы скроссированы (рис. 8.12), то для установления соединения $i-k$ достаточно подать напряжение на элемент $i.k$. До тех пор, пока существует это соединение, все элементы в строке i и столбце k за исключением $i.k$ будут оставаться без напряжения, независимо от того, как устанавливаются другие соединения. По этим причинам матричный коммутатор $n \times n$ представляется одним из наиболее эффективных при создании оптических коммутаторов с небольшим числом портов. Недостатком является сильный рост значений параметров n_c и n_L с возрастанием числа входных полюсов n .

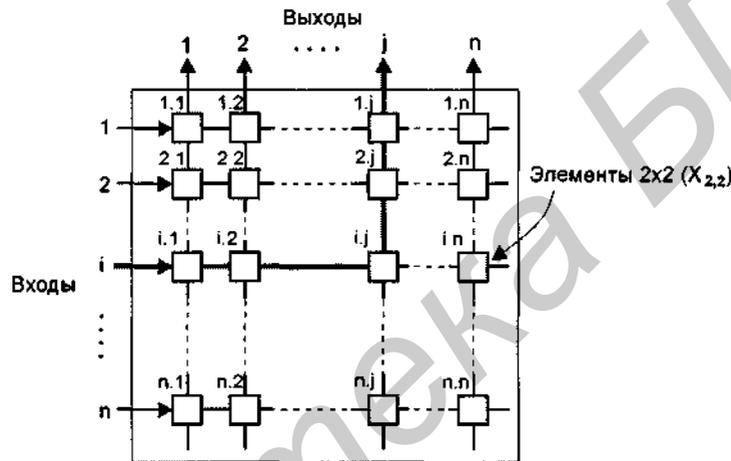


Рис. 8.12. Матричный коммутатор $n \times n$

Коммутатор $n \times n$ называется *блокирующим* (blocking), если существует перестановка (i_1, i_2, \dots, i_n) чисел $(1, 2, \dots, n)$, для которой невозможно найти n взаимно неблокированных путей, связывающих входные и выходные полюсы $(1, i_1), (2, i_2), \dots, (n, i_n)$. Наиболее известны три альтернативных типа блокирующего коммутатора: Delta $D_{n,2}$, Banyan $Y_{n,2}$ и Omega $\Omega_{n,2}$, (рис. 8.13) [18, 19]. Для коммутатора Delta рекурсивное определение выглядит так:

$$D_{2,2} = X_{2,2}, \quad D_{n,2} = X_{2,2} \times D_{n/2,2}.$$

Анализ коммутаторов Delta, Banyan и Omega показывает, что они имеют одинаковые предельно низкие значения параметров n_c и n_L среди блокирующих коммутаторов $n \times n$ (табл. 8.9), что обеспечивает им сравнительно низкую себестоимость. Эффективность блокирующих коммутаторов сильно падает с ростом числа входных каналов.

Коммутатор $n \times n$ называется *перестраиваемым неблокирующим* (rearrangeable non-blocking), если для любой заданной перестановки (i_1, i_2, \dots, i_n) чисел $(1, 2, \dots, n)$, всегда можно найти n взаимно неблокированных путей, связывающих входные и выходные полюсы $(1, i_1), (2, i_2), \dots, (n, i_n)$. В общем случае, такие пути получаются сильно взаимосвязанными. При использовании перестраиваемых неблокирующих коммутаторов можно встретиться с ситуацией,

когда для того, чтобы удовлетворить очередной приходящий запрос на установку соединения между определенными входными и выходными полюсами, может потребоваться перестройка внутренней структуры других соединений.

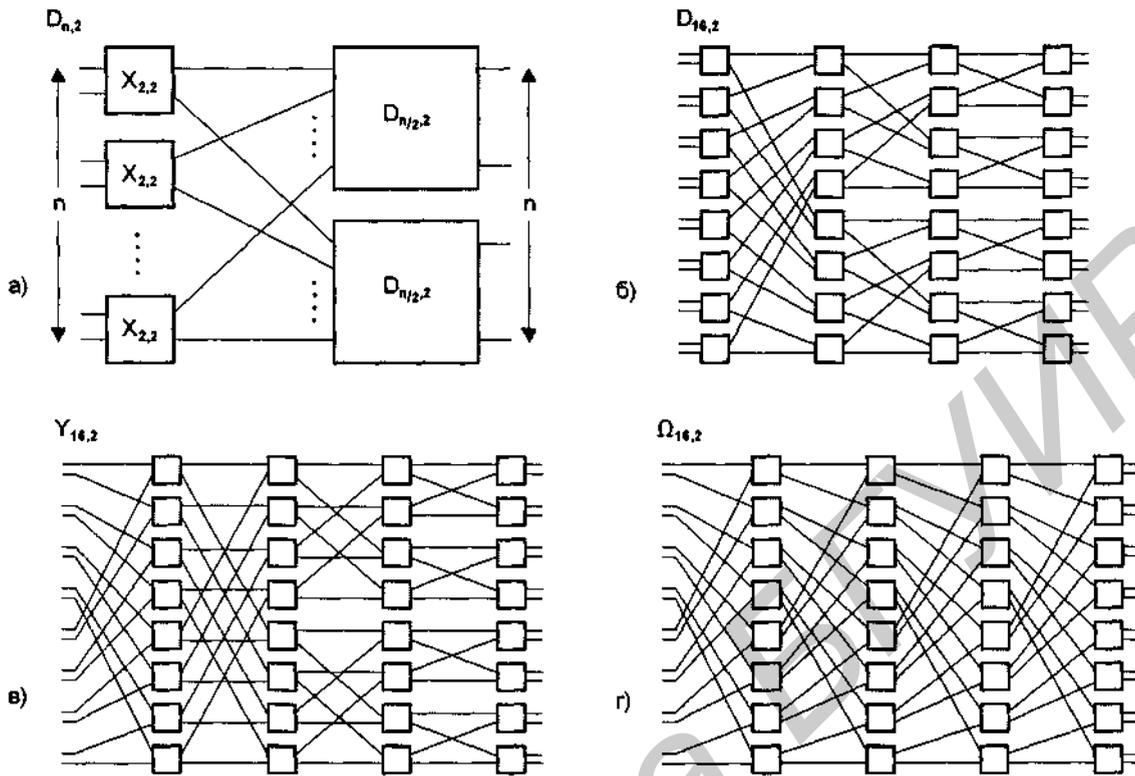


Рис. 8.13. Блокирующие коммутаторы: а) рекурсивное определение Delta коммутатора; б) Delta коммутатор 16x16; в) Banyan коммутатор 16x16; г) Omega коммутатор 16x16

Перестраиваемый неблокирующий коммутатор может быть построен путем модернизации рассмотренных блокирующих коммутаторов. Например, коммутатор Banyan с предшествующим Batcher сортировщиком позволяет устранить блокировки [20]. Такой улучшенный коммутатор (Batcher + Banyan, $S_n \times Y_{n,2}$) весьма эффективен и широко используется в технологии АТМ, где коммутация осуществляется по идентификационным полям в заголовке ячейки АТМ. Он имеет значительно меньшее число элементов ($\sim n \log_2(n^2)$), см. табл. 8.9) по сравнению с матричным коммутатором. Batcher сортировщик не исключает возможность косвенного изменения (перестраивания) существующего маршрута под действием сигналов, поступающих на другие порты. Коммутаторы $S_n \times Y_{n,2}$ могут найти широкое применение в полностью оптических сетях с коммутацией пакетов, обрабатывая приходящие пакеты аналогично тому, как АТМ коммутатор обрабатывает ячейки.

Еще один пример перестраиваемого неблокирующего коммутатора – так называемый Beneš коммутатор $B_{n,2}$ – показан на рис. 8.14 а. Как видно, он имеет большое сходство с Delta коммутатором, а его рекурсивное определение записывается в виде:

$$B_{2,2} = X_{2,2}, B_{n,2} = X_{2,2} \times B_{n/2,2} \times X_{2,2}.$$

На основе коммутатора $B_{n,2}$ строится строго неблокирующий Cantor коммутатор, (рис. 8.14 б, табл. 8.9), рекурсивное определение которого записывается в виде: $K_{n,2,m} = X_{1,m} \times B_{n,2} \times X_{m,1}$. Минимизация параметров n_c и n_l достигается при $m = \log_2 n$.

При больших значениях n – Cantor коммутатор будет иметь преимущество по параметрам n_C и n_L перед матричным коммутатором.

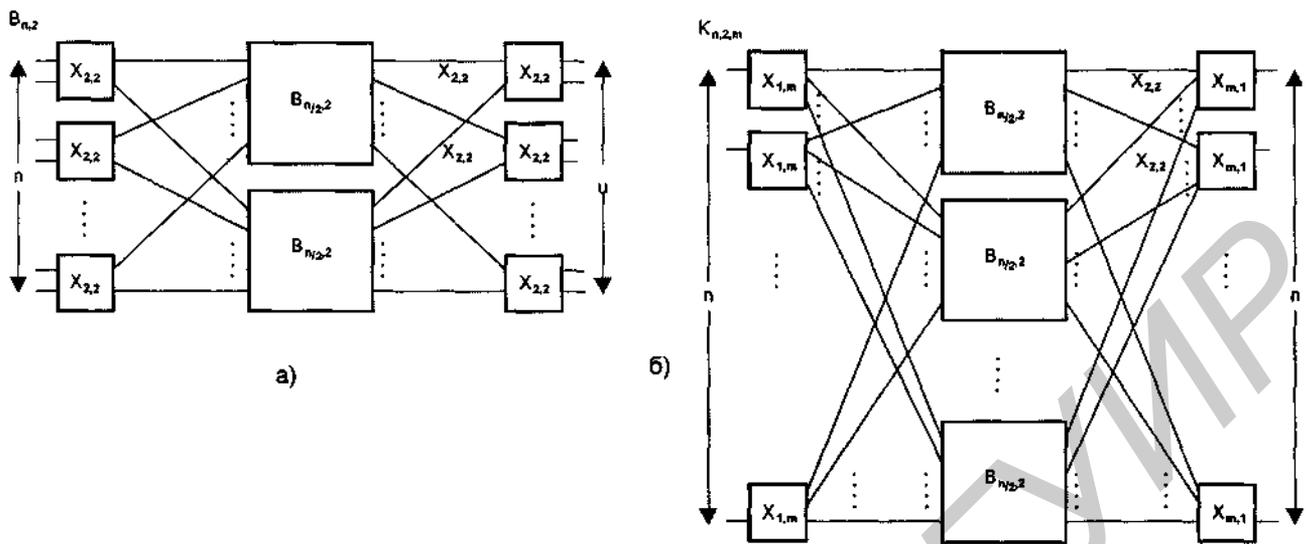


Рис. 8.14. Примеры перестраиваемых неблокирующих коммутаторов:
 а) рекурсивное определение Beneš коммутатора;
 б) рекурсивное определение Cantor коммутатора

Таблица 8.9. Характеристики коммутаторов

Название коммутатора	Символьное обозначение	Тип коммутатора	n_C	n_L
Delta	$D_{n,2}^*$	Блокирующий	$\frac{n}{2} \log_2 n$	$\log_2 n$
Banyan	$Y_{n,2}$	Блокирующий		
Omega	$\Omega_{n,2}$	Блокирующий		
Batcher + Banyan	$S_n \times Y_{n,2}$	Перестраиваемый неблокирующий	$\frac{n}{4} \log_2 n (3 + \log_2 n)$	$\frac{1}{2} \log_2 n (3 + \log_2 n)$
Beneš	$B_{n,2}$	Перестраиваемый неблокирующий	$\frac{n}{2} (2 \log_2 n - 1)$	$2 \log_2 n - 1$
Cantor	$K_{n,2,m}$	Строго неблокирующий	$n(\log_2 n)^2 + \frac{3n}{2} \log_2 n - 2n$	$2 \log_2 (\log_2 n) + \log_2 n$
Crossbar	$X_{n,2}$	Строго неблокирующий	n^2	$2n - 1$

* n – число входных/выходных полюсов (2 характеризует тип элемента – 2x2)

8.6. Волновые конвертеры

В рамках концепции полностью оптических сетей *волновой конвертер* осуществляет чисто оптическое преобразование длины волны приходящего сигнала в другую длину волны. Принцип действия такого преобразования, также известного как λ -конверсия, основан на эффектах нелинейного взаимодействия исходного оптического сигнала со специальным сигналом от лазера накачки, в результате чего образуется излучение новой длины волны. Преобразование полностью прозрачно по отношению к частоте модуляции и в отличие от оптоэлектронных преобразований не вносит задержки и способно работать вплоть до очень высоких частот модуляции (10 Гбит/с и выше). В перспективе ожидается появление волновых конвертеров, осуществляющих одновременно преобразование длин волн сразу нескольких входящих сигналов, причем в пределах широкого волнового диапазона и малыми вносимыми шумами.

Один из методов волновой конверсии основан на использовании ферроэлектрического кристалла, внутри которого создаются условия для нелинейного оптического взаимодействия (рис. 8.15 а). Периодическая структура с чередующейся сменой направлений поляризации увеличивает эффективность волнового преобразования. При одновременном распространении входного сигнала и сигнала от лазера накачки происходит генерация света на частоте, равной разности частоты волны накачки входного сигнала, т.е. выполняется закон сохранения энергии: $1/\lambda_c = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$.

На рис. 8.15 б) показан пример экспериментальных профилей мощности входного ($\lambda_s = 1536$ нм) и выходного ($\lambda_c = 1545$ нм) сигналов при длине волны накачки $\lambda_p = 770$ нм, полученных с использованием такой периодической структуры. Основные технические параметры системы: мощность лазера накачки 10 мВт; диапазон длин волн перестраивания лазера накачки – 100 нм; полная длина кристаллической структуры 10 мм.



Рис. 8.15. Схема и профили мощности волнового конвертера: а) схема волнового конвертера с периодической ферроэлектрической структурой; б) профили мощности входного и выходного сигналов (по материалам фирмы OKI Electric Industry [21])

Другое решение реализовано в работе [22]. В качестве нелинейной среды используется волокно с нулевой смещенной дисперсией DSF длиной 2 км. Нелинейный эффект, приводящий к генерирующей новой длине волны, основывается на четырехволновом смешивании, причем закон сохранения энергии записывается в виде: $2/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_c$ (используются прежние обозначения). Разумеется, наибольшая эффективность достигается в окрестности точки нулевой дисперсии, где значительно возрастает сечение четырехволнового смешивания. В связи с этим длину волны лазера накачки следует выбирать как можно ближе к длине волны нулевой дисперсии волокна DSF.

8.7. Классификация полностью оптических сетей

Наращивание емкости. По мере роста объема передаваемой информации по сети рано или поздно возникает задача увеличения емкости сети. Менее трудоемкое наращивание волоконно-оптических сетей происходит либо при помощи замены коммутаторов в центральных узлах на более мощные электронные устройства, рассчитанные на скорость передачи по волокну до 1 Гбит/с, 2,5 Гбит/с или до 10 Гбит/с и имеющие различные вариации механизма пакетной коммутации ATM/SDH, Gigabit Ethernet и т.д., либо при помощи привлечения ранее не используемых резервных "темных" волокон в проложенных ВОК. Что делать, если больше не осталось "темных" волокон? Один из путей – прокладывать новые кабели, но такое решение может оказаться очень дорогим, неудобным и не всегда быстрым. Другой путь – привлечение оптических технологий и построение магистралей на основе технологий полностью оптических сетей AON, что делает возможным значительно повысить экономичность, гибкость и надежность сетей, и, самое главное – значительно увеличить пропускную способность, не переоборудуя существующие кабельные системы.

Категории AON. Все AON можно разбить на три основные категории [23, 29]: сети, использующие многоволновые (мультиплексные) линии связи, сети с коммутацией каналов и сети с коммутацией пакетов (табл. 8.10).

Таблица 8.10. Классификация полностью оптических сетей AON

Категория сети	Подкатегория	Характеристики
Многоволновая мультиплексная линия связи	–	Полностью прозрачная по отношению к оконечным узлам
Полностью оптическая с коммутацией каналов	Широковещательная (пассивная) сеть	Полностью прозрачная
	Сеть с пассивной волновой маршрутизацией	Полностью прозрачная
	Сеть с активной волновой маршрутизацией	Полностью прозрачная
Полностью оптическая с коммутацией пакетов	Сеть с последовательной битовой коммутацией пакетов	Прозрачная при использовании установленного протокола
	Сеть с параллельной битовой коммутацией пакетов	Прозрачная при использовании установленного протокола

Прозрачные AON. Первые две категории AON имеют одну важную характеристику – прозрачность сети по отношению к используемому приложению. Главным фактором прозрачной AON выступает гибкость по отношению к используемым конечными узлами приложениями (ATM, FDDI, и т.д.). Оптическая прозрачность (передача оптического сигнала в формате приложения – код, частота модуляции) достигается по любому из оптических WDM каналов от узла-источника до узла-назначения без использования оптоэлектронных устройств преобразования сигнала. Сигнальный формат в пределах каждого WDM канала может быть виртуально произвольным, обеспечивая экономичность и гигантский потенциал наращивания. Кроме чисто пассивных компонентов (мультиплексоров, демультиплексоров, ответвителей), прозрачные AON могут содержать активные элементы, такие как, конфигурируемые волновые маршрутизаторы, волновые конвертеры, оптические коммутаторы. Даже если управление этими устройствами электронное, весь путь распространения самого сигнала остается оптическим. Электронный контроль требует меньшей полосы (допустимо под управление выделение специального отдельного канала) и используется, главным образом, для реконфигурирования узлов сети, WDM каналов, изменения структуры потоков, удовлетворяя различным требованиям пользователей.

Оптическое терминальное оборудование в прозрачной AON в наиболее общем случае представляют: перестраиваемые лазерные передатчики (tunable-laser transmitters) и/или перестраиваемые поворотные фильтры (tunable filters или heterodynes). Два оконечных узла сети могут установить канал связи через такую сеть посредством настройки на определенные две волны (для приема и передачи), которые им предоставляет сетевой контроллер оптического терминала, обработав соответствующий предварительный запрос. После установления со-

единения магистральный канал становится прозрачным по отношению к используемому приложению.

Допускается более интересная возможность, когда любая группа пользователей может получить соответствующий набор длин волн от прозрачной AON и организовать свою собственную виртуальную сеть. Каждый пользователь в этой сети способен открыть одновременно несколько сессий. Таким образом, прозрачная AON потенциально обладает очень богатыми возможностями объединения пользователей на локальном или глобальном масштабах расстояний.

Простая многоволновая линия связи SMWL

Этот тип сети представляет простейший способ организации архитектуры AON (для простоты указано только одно направление передачи данных, рис. 8.16). Такой канал связи позволяет организовать множество соединений "точка-точка" между однотипными узлами, которые общаются на вполне определенных, предназначенных исключительно для них, длинах волн. Преимуществами данной сети являются: большая полоса пропускания, отводимая на каждую пару взаимодействующих между собой пользователей; высокая надежность связи вследствие гарантированной полосы пропускания (под каждый канал отводится отдельная длина волны); прозрачность каждого канала сети по отношению к выбору сетевого приложения (ATM, Gigabit Ethernet, SDH/PDH и т.д.) между оконечными узлами. Недостатком является наличие жестко зафиксированных соединений по каналам.

В настоящее время в сетях кабельного телевидения получили большое распространение симплексные многоволновые линии связи, в которых передача ведется только в одном направлении.

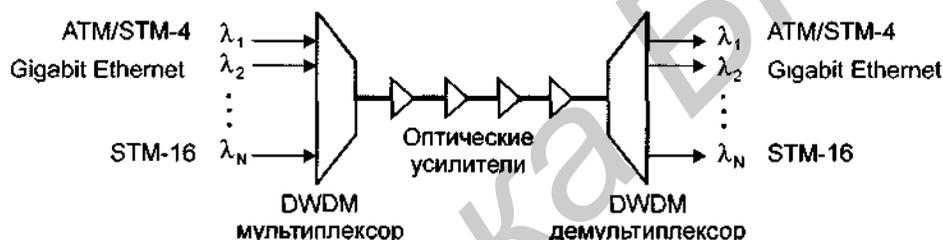


Рис. 8.16. Простая многоволновая линия связи

Многоволновая линия связи не является полноценной сетью, поскольку не позволяет осуществлять соединения удаленных узлов по принципу "каждый с каждым". Она выполняет исключительно функции транспортной магистрали высокой емкости и подобно магистралям SDH обеспечивает статическое соединение "точка-точка", только с частотным мультиплексированием. Многоволновые линии связи могут находиться в составе более сложных архитектур полностью оптических сетей.

Параметры многоволновых мультиплексных линий связи

Три основные черты магистральной многоволновой линии связи – высокая частота модуляции сигналов в каналах (высокая битовая скорость), высокая плотность мультиплексных каналов и большие расстояния сегментов – заставляют более строго подходить к требованиям по передаче информации. Наиболее важные факторы, ограничивающие технические возможности оптической линии, приведены ниже [24].

Соотношение сигнал/шум. Для того, чтобы поддерживать необходимое соотношение сигнал/шум, число последовательных узлов EDFA, включенных в световой путь, должно быть ограничено. Как было показано в п. 8.3, оптические усилители EDFA вносят шум, и при большом числе последовательных соединений могут приводить к значительной деградации сигнала. Моделирование без учета влияния дисперсии сигнала в волокне показывает, что максимум 18 каскадов EDFA может быть установлено между регенераторами при скорости передачи 622 Мбит/с с приемлемым для стандарта STM-4 соотношением сигнал/шум, всего 11 узлов при скорости передачи 2,5 Гбит/с с удовлетворительным соотношением сигнал/шум. Ре-

альное число каскадов EDFA из-за дисперсионной деградации сигнала уменьшается примерно в два раза.

Полоса пропускания усилителей EDFA. Поскольку передаточная характеристика EDFA в рабочей области не плоская даже для фтор-цирконатных EDFA, то разброс в 2 дБ остается при коэффициенте усиления 30 дБ. После 50 каскадов усиления начальная зона в 30 нм сокращается до 10 нм. С этой точки зрения желательно для передачи использовать плотно расположенные волновые каналы (DWDM) и в области наибольшего плато. При передаче мультиплексного сигнала, размещенного в широкой зоне EDFA, в случае большого числа каскадов, могут требоваться специальные эквалайзеры, вносящие затухание на тех длинах волн, соответствующие каналы которых испытывают наибольшее усиление.

Поперечные помехи. Поперечные помехи могут быть как межзонными, так и внутризонными. Межзонные помехи возникают между двумя различными длинами волн и обычно не носят кумулятивный характер, поскольку существует множество фильтров в сети. Для их подавления достаточно поставить соответствующий узкозонный фильтр перед оптическим приемником. Внутризонные помехи значительно сложнее контролировать. Они могут накапливаться, и простым способом их подавить невозможно. Анализ показывает, что чувствительность фильтра должна быть более, чем на 20 дБ ниже для соседней длины волны, чтобы минимизировать эффект внутризонных помех. Внутризонные помехи могут включать когерентные биеения. При расчете и создании архитектур полностью оптических сетей следует оценивать вклад от внутризонных помех. Простые фильтры типа Фабри-Перо не имеют достаточно резкой передаточной характеристики, чтобы уменьшить внутризонные поперечные помехи.

Линейная дисперсия волокна. Основным фактором является систематическое накопление хроматической дисперсии в одномодовом волокне, которая для волокна типа NZDSF может достигать 5-6 пс/нм в расчете на 1 км. Полная допустимая величина дисперсии в оптическом сегменте между регенераторами зависит от стандарта.

Нелинейная дисперсия EDFA. Использование оптических усилителей позволяет компенсировать потери мощности в волокне, но это создает дополнительные нелинейности – хвосты в спектральном представлении сигнала (волнового пакета), несущие меньшую мощность испытывают большее усиление по сравнению с центральной частью пакета, приводя к появлению нелинейной дисперсии. Увеличение пролетов между каскадами EDFA, и, соответственно, уменьшение числа самих каскадов, снижает нелинейную дисперсию, но усиление более слабого сигнала приводит к уменьшению соотношения сигнал/шум.

Поляризационная модовая дисперсия (PMD). Эта дисперсия возникает в волокне из-за неидеальной циркулярности реального волокна. Практически PMD начинает вносить ограничение на длину безрегенерационного участка только при очень большой скорости передачи на канал (10 Гбит/с). При этом максимальное значение PMD в линии не должно быть больше $1/10$ от битового интервала [25, 26]. PMD нелинейно зависит от расстояния L (как $L^{-1/2}$), поэтому растет медленнее с ростом расстояния.

Стимулированное Рамановское рассеяние. Этот нелинейный эффект, также известный как спонтанное комбинационное рассеяние, связан с рассеянием света на колебаниях поляризованных молекул волокна. Под действием света большой интенсивности происходит поляризация совершающих тепловые колебания молекул, при этом сам падающий свет испытывает рассеяние, трансформируя часть своей энергии как в традиционный рэлеевский компонент (на частоте падающего света ν), так и в два боковых нелинейных компонента: *стоксовый* (на частоте $\nu - \delta$) и *антистоксовый* (на частоте $\nu + \delta$), где δ – частота колебаний молекул в волокне. Именно два нелинейных компонента приводят к поперечным помехам между каналами в мультиплексном сигнале и, в конечном итоге, к его деградации. Из-за этого, в частности при мощности передатчика 0 дБм и межканальном интервале 4 нм, только 8 каналов можно мультиплексировать при протяженности линии 1000 км, и только 4 канала при протяженности 8000 км [27].

Четырехволновое смешивание FWM. Природа нелинейного эффекта FWM связана с наличием слабой зависимости показателя преломления волокна от интенсивности распространяемого по нему света, в результате чего из двух волн с частотами ν_k, ν_l появляется две новые волны с частотами ν_k и ν_l , причем $\nu_k + \nu_l = \nu_k + \nu_l$, как того требует закон сохранения энергии. При попадании новых волн в спектральные области существующих каналов будут иметь место поперечные помехи между каналами. Влияние поперечных помех из-за FWM увеличивается с приближением хроматической дисперсии к нулю и максимально в окрестно-

сти точки нулевой дисперсии. Наиболее сильно подвержено влиянию FWM волокно с нулевой смещенной дисперсией DSF – длина волны нулевой дисперсии у этого волокна попадает в рабочую область усиления EDFA.

Итак, технические параметры оптических систем – протяженность сегментов, число мультиплексных каналов в одном волокне, интервалы между каналами, битовая скорость и др. – в большой степени взаимосвязаны между собой и зависят от перечисленных факторов. Для увеличения транспортных свойств следует руководствоваться следующими критериями:

- уменьшать интервалы между каналами (при этом необходимо принимать во внимание, что в волокне DSF сильные поперечные помехи в каналах могут возникать из-за FWM по мере приближения к точке нулевой дисперсии);
- минимизировать число длин волн при протяженных пролетах и большом числе каскадов EDFA;
- стремиться не делать очень большой мощностью вводимого в волокно излучения – в противном случае, все нелинейные эффекты начинают проявляться особенно сильно (новое волокно фирмы Corning LEAF с большим диаметром модового поля MFD позволяет уменьшить влияние нелинейных эффектов при сохранении прежней мощности, вводимой в волокно, поскольку интенсивность излучения на единицу площади сечения сердцевинки уменьшается);
- использовать оптические усилители с большой мощностью насыщения;
- по возможности, уменьшать число оптических компонентов, вносящих потери.

8.8. AON с коммутацией каналов

Две первые подкатегории AON с коммутацией каналов (широковещательные сети и сети с пассивной волновой маршрутизацией) представляют собой *пассивные сети* PON (passive optical network). PON – это AON, использующая только пассивные оптические компоненты: волокна, направленные ответвители, разветвители, волновые мультиплексоры, и фильтры. Особенностью PON является низкая цена, низкие затраты на поддержку или полное ее отсутствие, а основные сферы приложения – это “волокну-в-дом” (fiber-to-the-home) или “волокну-по-кругу” (fiber-in-the-loop). Таким образом, экономичность и низкие затраты на поддержание сети (философия the “bury it and forget it”) – главные цели такой сети, даже при понижении ее производительности. При построении PON не исключается частичная, в основном для преодоления больших расстояний, возможность использования оптических усилителей EDFA, хотя последние и не являются чисто пассивными компонентами.

Широковещательная AON

Каждому удаленному узлу широковещательной AON обычно приписывается определенная длина волны, на которой узел ведет передачу. Сигналы со всех удаленных узлов собираются в оптическом звездообразном разветвителе, где они смешиваются и распределяются по выходным полюсам в волокна, идущие обратно к удаленным узлам, каждый узел получает мультиплексный сигнал, представленный всеми длинами волн, рис. 8.17.

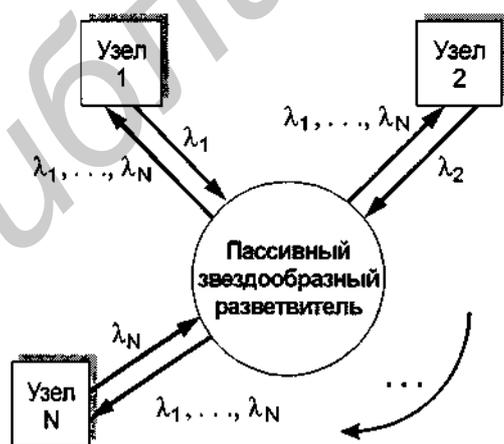


Рис. 8.17. Широковещательная AON

Примечательно, что в качестве центральных элементов сети используются один или несколько звездообразных разветвителей, не имеющих избирательной функции по длинам волн, как WDM. Каждый удаленный узел сам определяет, канал какой длины волны из принимаемого мультиплексного потока выбрать. В качестве приемного элемента может служить либо перестраиваемый в соответствии с протоколом управления фильтр с одним фотоприемником, либо демультиплексор WDM с множеством фотоприемников, подключенных к выходным полюсам.

Два проекта-прототипа широковещательных вычислительной AON реализованы фирмой IBM: Rainbow-1 (1991 год) и Rainbow-2 (1995 год) [28].

Архитектура Rainbow-1 – охватывает 32 удаленных станции типа IBM PS/2. Электронные и оптические сетевые элементы встроены в две стандартные Micro Channel карты.

Основные характеристики:

- каждая станция оснащена передатчиком фиксированной длины волны и приемником с перестраиваемой длиной волны;
- передаваемые длины волн лежат в диапазоне от 1505 нм до 1545 нм;
- оптоэлектронному приемнику предшествует фильтр Фабри-Перо с перестраиваемым диапазоном 50 нм. Скорость перестройки длины волны 10 мкс/нм, что соответствует среднему времени настройки на нужный канал 250 мкс;
- скорость передачи данных 200 Мбит/с по стандартному одномодовому волокну SF 8/125.

Принцип работы:

- Если станция А хочет передать информацию станции В, она поступает следующим образом:
 1. Начинает передавать запрос на разрешение передачи для станции В. Это – повторяющаяся последовательность коротких сообщений и сигнала синхронизации на длине волны λ_A .
 2. Перестраивает свой приемник на длину волны λ_B станции В.
- Если станция В занята в это время (например, принимает данные от третьей станции), то станция А будет продолжать посылать запросы на разрешение передачи для станции В.
- Если станция В свободна, она последовательно по циклу сканирует весь диапазон длин волн, проверяя наличие запросов от других станций, предназначенных ей.
- Когда станция В обнаруживает адресованный ей запрос (в данном случае запрос от станции А), она фиксирует свой перестраиваемый фильтр на длине волны λ_A этого запроса, и сразу же посылает подтверждение станции А. Это происходит быстро, так как станция В всегда передает на фиксированной длине волны λ_B , а станция А уже настроила свой приемник на эту длину волны.
- После этого обе станции могут свободно обмениваться данными, до тех пор, пока они не решат разорвать соединение.

Архитектура Rainbow-2 – представляет прототип широковещательной полностью оптической сети следующего поколения по отношению к Rainbow-1. Хотя принципы построения сети остались прежние, практические возможности архитектуры Rainbow-2 сильно возросли:

- Rainbow-1 – это сеть, ориентированная на взаимодействие рабочих станций в пределах ЛВС. Rainbow-2 предназначена для взаимодействия суперкомпьютеров и организации быстрого доступа к ним;
- если Rainbow-1 базировалась на установленных в PS/2 специальных адаптерах Micro Channel, то Rainbow-2 использует внешние модули, которые наделены рядом функций для разгрузки процессоров хост-компьютеров;
- в Rainbow-2 возросла скорость передачи данных до 1 Гбит/с в расчете на станцию при длинах оптических сегментов до 15 км и прежнем числе рабочих станций до 32.

Допустима альтернативная архитектура широковещательной AON, в которой узлу разрешено принимать сигнал только на одной фиксированной, предназначенной только для этого узла, длине волны, а передавать на разных длинах волн, используя перестраиваемый ла-

зер [29]. Общий протокол работы такой сети будет схож с протоколом случайного доступа CSMA.

Поскольку центральной узел широковещательной AON и все оптические сегменты являются чисто пассивными элементами, такая сеть имеет очень высокую надежность.

В то же время, широковещательную AON невозможно использовать в качестве магистралей для глобальных сетей по двум проблемам. Во-первых, энергия передатчика от каждого узла распределяется между всеми остальными узлами, в результате чего большая доля энергии тратится при разветвлении вхолостую. Эту проблему можно решить привлечением оптических усилителей, хотя при этом снижается надежность. Во-вторых, каждый узел широковещательной AON требует индивидуальной длины волны, так что полное число узлов в сети ограничивается максимальным числом каналов, которые можно мультиплексировать в одно волокно. Теоретический предел числа различных длин волн, которые можно мультиплексировать в отдельное волокно с использованием техники плотного волнового мультиплексирования DWDM составляет порядка 200. Далее, если даже допустить, что для передачи используется 20 волокон, то можно объединить порядка 4000 узлов, что катастрофически мало для построения единой информационной магистрали на Земле. Принципиальная невозможность построения масштабируемых архитектур широковещательных сетей ограничивает их сферу применения локальным масштабом.

AON с пассивной волновой маршрутизацией

Частично обе проблемы могут быть решены на основе AON с пассивной волновой маршрутизацией, рис. 8.18. В такой сети сигнал определенной длины волны может перенаправляется (статически маршрутизируется) в узел назначения через последовательность промежуточных узлов вместо того, чтобы широковещательно распределяться между всеми оконечными узлами сети. Это позволяет экономить энергию оптического сигнала из-за отсутствия разветвителей и допускает одновременное использование сигналов, представленных одной и той же длиной волны в разных неперекрывающихся частях сети.

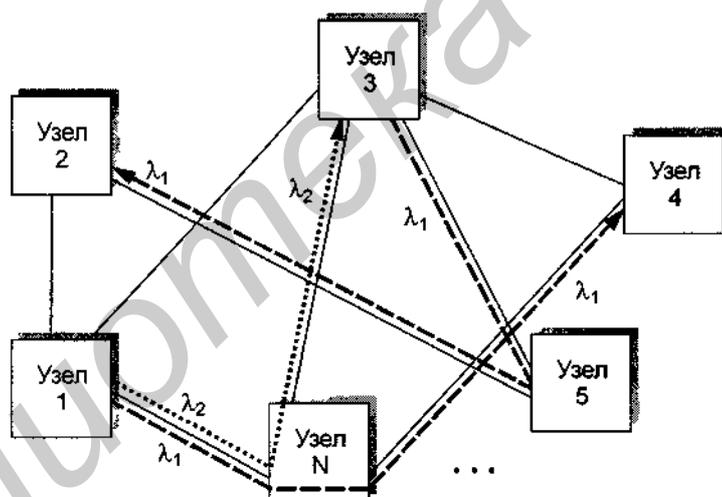


Рис. 8.18. AON с пассивной волновой маршрутизацией

Промежуточными узлами сети с пассивной волновой маршрутизацией являются статические маршрутизаторы, выполненные преимущественно на основе WDM мультиплексоров.

AON с активной волновой маршрутизацией

Дальнейшее наращивание сети связано с переходом от статической к динамической маршрутизации. Маршрутизация на узлах становится активной и допускает дистанционное конфигурирование. Динамическая маршрутизация, прежде всего, предполагает использование оптических коммутаторов.

На рис. 8.19 показан пример многоуровневой архитектуры сети AON с коммутацией каналов, в которой на уровне групп реализована ширококвещательная AON, не выходящая за пределы группы (для этой цели выделяются определенные длины волн, в разных группах локально можно использовать один и тот же набор длин волн), на более высоком уровне (уровнях) реализуется сеть с динамической волновой маршрутизацией.

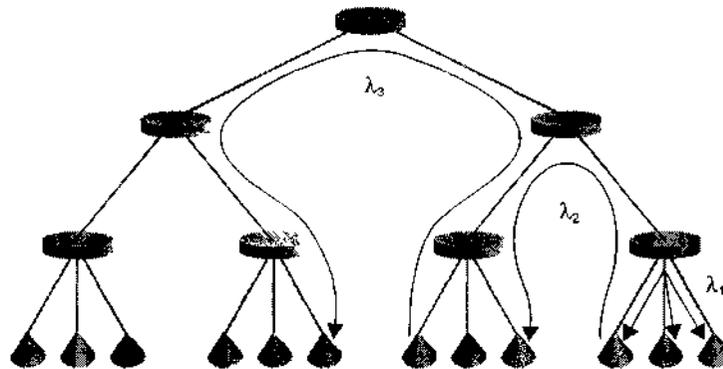


Рис. 8.19. Пример архитектуры AON с коммутацией каналов

Волновая конверсия. Безусловно, динамическая маршрутизация в AON с коммутацией каналов предоставляет большую гибкость. Однако для достижения максимума масштабируемости, наряду с активной волновой маршрутизацией, должна быть реализована волновая конверсия, которая позволяет установить соединение между волновыми каналами, представленными разными длинами волн. Волновая конверсия также позволяет наиболее эффективно использовать предоставленное ограниченное число волновых каналов. Здесь можно провести аналогию с технологией ATM, где допускается одновременное использование разными ATM-коммутаторами одних и тех же значений идентификаторов виртуальных каналов VCI (Virtual Circuit Identifier).

Преимущество волновой конверсии можно продемонстрировать на упрощенном примере сети, в которой мультиплексные сигналы в каждом волокне представлены максимум двумя каналами, рис. 8.20. Будем считать, что все оконечные узлы (станции) могут передавать или принимать сигналы на любой из двух длин волн, а маршрутизаторы, не меняя длины волн, могут по требованию перенаправлять канал в любом доступном направлении с одним условием, что при этом не возникает блокировки в выходном сегменте.

Первый этап (рис. 8.20 б). Станция А начинает вести передачу для станции Е (на длине волны λ_1). Далее передачу начинает станция D для станции Н. Длина волны этой передачи может быть только λ_2 , так как в сегменте S_2 канал с длиной волны λ_1 уже представлен.

Второй этап (рис. 8.20 б). Стартуют передачи от В к С и от F к G. Длины волн этих передач определяются однозначно.

Третий этап (рис. 8.20 в). Прекращаются передачи от А к Е и от D к Н, после чего станция А желает передавать для станции Н. Без волновой маршрутизации, т. е. используя только одну длину волны (λ_1 или λ_2), это сделать невозможно, не возмущая другие передачи – возникает блокировка либо на участке S_2 , либо на S_1 . Если же допускается общее реконфигурирование, то можно предварительно перестроить длину волны передачи между F и G с λ_1 на λ_2 , после чего начать передачу от А к Н на длине волны λ_1 (сравните с перестраиваемыми неблокирующими коммутаторами, п. 8.5). Однако перестраиваться с одной длины волны на другую во время передачи весьма неудобно – при непрерывном потоке данных это может вести к потере информации.

Волновой конвертер предоставляет значительно более гибкое решение, рис. 8.20 г .

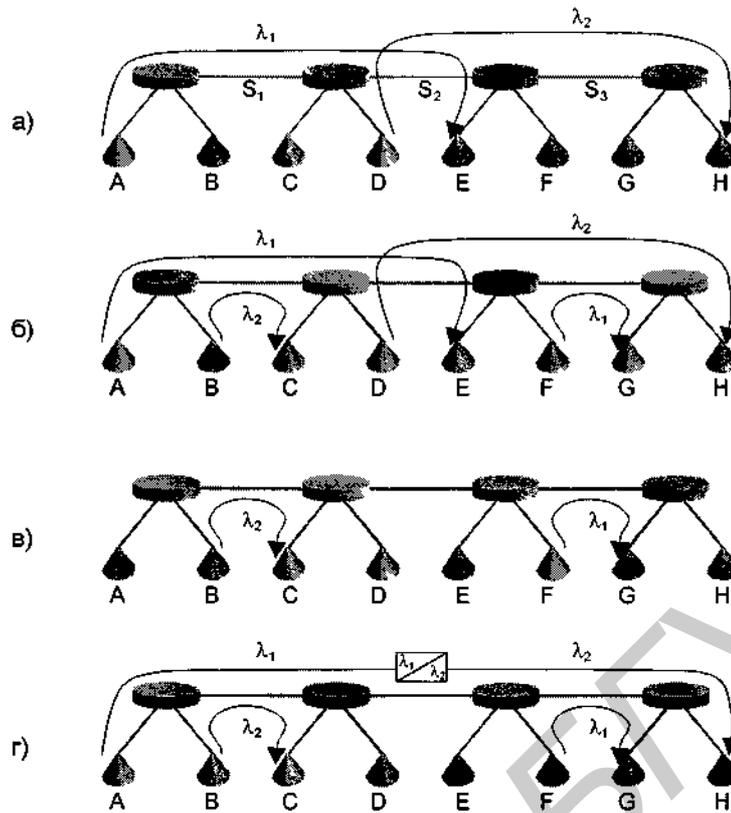


Рис. 8.20. AON с динамической волновой маршрутизацией:
 а)-в) ограничения, возникающие в сети без волновой конверсии;
 г) волновая конверсия делает сеть более гибкой

Кроме увеличения гибкости сети, наличие волновой конверсии ведет к росту волновой эффективности (рис. 8.21), показывающей какое максимальное число различных пар соединений в среднем приходится на одну длину волны [29].

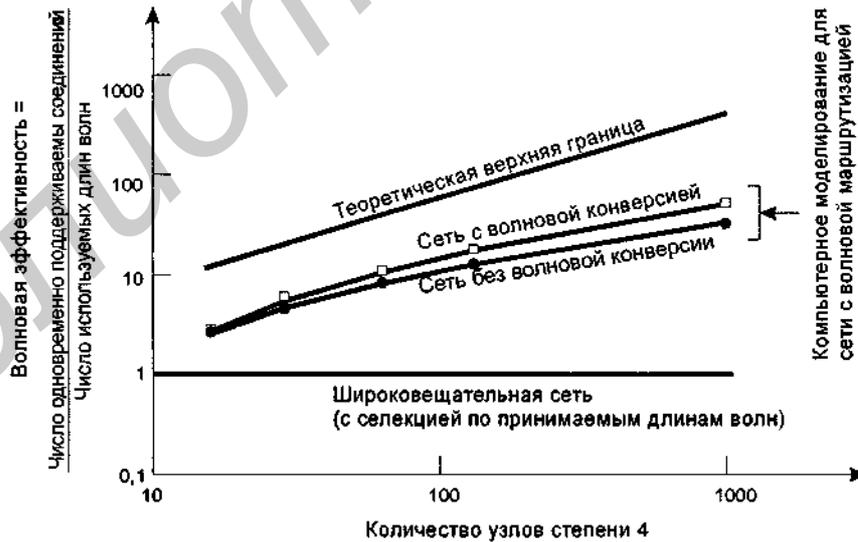


Рис. 8.21. AON с коммутацией каналов. Сравнение эффективностей широковещательных AON и AON с волновой маршрутизацией

Пример сети с центральным узлом на основе волновых конвертеров показан на рис. 8.22. Каждый узел передает сигнал на фиксированной длине волны, а также принимает сигнал на фиксированной, индивидуальной (установленной для данного узла) длине волны. Выбор длины волны передачи удаленной станции – не принципиален. Так, в частности, все станции могут передавать на одной и той же длине волны. Центральный узел коммутации принимает оптические сигналы от всех удаленных узлов и конвертирует их в сигналы других длин волн в соответствии с инструкциями от управляющего компьютера. Звездообразный комбайнер-разветвитель смешивает сигналы разных длин волн и распределяет по всем выходным полюсам.

Логическому соединению между двумя удаленными узлами предшествует настройка соответствующих волновых конвертеров. Если узел С желает передать сообщение для узла А, то выполняется следующая последовательность действий:

- узел С размещает специальный запрос для разрешения передачи для узла А, который обрабатывается управляющим компьютером;
- если узел назначения (А) свободен, управляющий компьютер обменивается сообщениями с этим узлом, получая подтверждение о том, что узел А готов установить соединение;
- если все в порядке, управляющий компьютер сообщает узлу С, что будет установлено соединение с узлом А;
- управляющий компьютер устанавливает соединение между узлами А и С.

Главный недостаток этого подхода – относительно длительный процесс установления соединения. В этом смысле, время установления соединения в ранее рассмотренных прототипах сетей Rainbow-1/2, связанное с перестройкой фильтра, значительно меньше. В то же время, приведенный пример сети с центральным элементом, имеет несколько сильных сторон:

- очень простой централизованный контроль. Нет проблемы, связанной с разрешением коллизий;
- возможно использование одной и той же реперной частоты для всех передатчиков, что означает потенциальную допустимость более плотной упаковки волновых каналов; хотя в некоторых случаях приемникам может и понадобится стабилизация;
- главное преимущество рассмотренной централизованной сети в том, что она (при очень больших скоростях передачи – 1 Гбит/с и более) должна быть значительно ниже по цене, чем сеть с чисто электронным коммутатором в центральном узле.

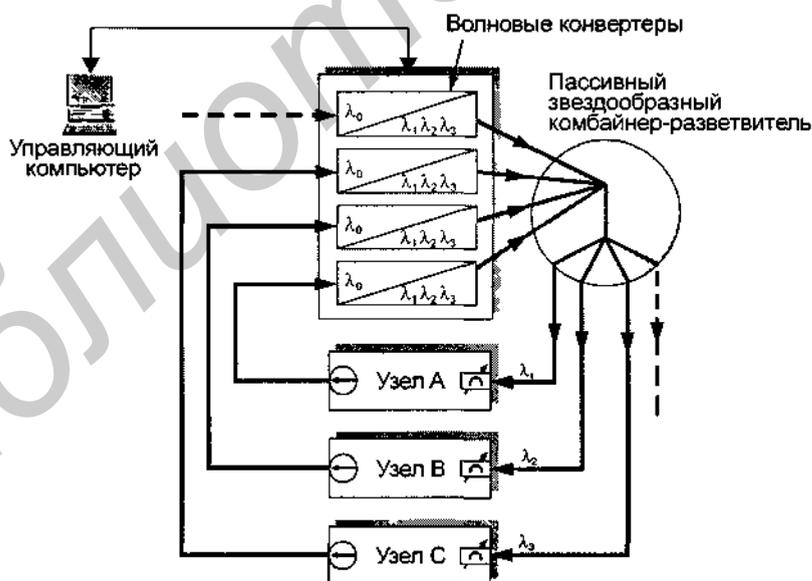


Рис. 8.22. AON с коммутацией каналов: центральный узел сети выполнен на основе волновых конвертеров

8.9. AON с коммутацией пакетов

Рассмотренные в предыдущем параграфе полностью оптические сети с коммутацией каналов позволяют строить оптические магистрали, прозрачные к использованию любых приложений со стороны конечных сетевых узлов. Но наряду с этим достоинством, отмечается и один их недостаток – сети с коммутацией каналов не могут работать с "взрывным трафиком" от локальных сетей передачи данных. В этой связи внедрение полностью оптических сетей с коммутацией пакетов было бы идеальным, поскольку они позволяют значительно эффективней использовать отведенную полосу пропускания волоконно-оптических каналов связи.

Особенности AON с коммутацией пакетов

- Коммутация пакетов в AON представляет совершенно новое направление развития сетей. Это означает, что должны быть разработаны совершенно новые схемы маршрутизации, новые архитектуры, ориентированные на технологию AON.
- Все схемы маршрутизации оптических потоков должны быть единообразны для всей AON с коммутацией пакетов. Это требование для сетей с коммутацией каналов было более мягким и ограничивалось, в основном, только наличием единого частотного плана.
- В технологиях полностью оптических сетей одной из сложных задач считается создание оптических буферов. Поэтому предпочтение будет отдаваться оптическим пакетным коммутаторам, использующим технологию коммутации без буферизации (cut through).
- Новые архитектуры должны учитывать специфические особенности каждого оптического домена, чтобы выгодно использовать их для упрощения конструкции.

Далее рассмотрены два метода пакетной коммутации в AON: последовательная битовая и параллельная битовая коммутация пакетов.

Сеть с последовательной битовой коммутацией

Оптическая *последовательная битовая коммутация* BSPS (bit-sequential packet switching) – это метод прямого управления электроникой коммутационных элементов, в отличие от методов, используемых в сетях с коммутацией каналов. При использовании BSPS заголовок пакета в канале взятой длины волны кодируется последовательностью из p *бинарных битов* (битовая 1 определяется наличием оптического сигнала, а битовый 0 – его отсутствием). Эти биты устанавливают коммутатор в надлежащее состояние, позволяя следующему за заголовком телу пакета свободно идти через коммутатор к соответствующему выходному полюсу. Поскольку коммутатор прозрачен к телу пакета, то такая сеть сохраняет название полностью оптической сети. Для заголовка из p битов существует 2^p различных адресов узлов сети. Волновое мультиплексирование позволяет значительно увеличить передающую емкость, но приводит к дополнительному усложнению. Прежде, чем выполнить пакетную коммутацию каналов, необходимо предварительно демультиплексировать сложный сигнал, а на выходе коммутаторов – повторно мультиплексировать соответствующие выходные симплексные каналы.

Самомаршрутизирующаяся сеть с волновой адресацией SWANET (Self-routed Wavelength-Addressable Network) является улучшением бинарной BSPS архитектуры [30]. SWANET использует преимущества BSPS и WDM, в результате чего значительно увеличивается допустимое число различных адресов, устанавливаемых битами заголовков пакетов (рис. 8.23). SWANET имеет аналогичную BSPS структуру пакета. Заголовок, за которым следует поле данных, кодируется последовательностью из p битов, охватывая сразу несколько волновых каналов. Заголовок и поле данных используют один и тот же набор длин волн. Если число длин волн k , то каждый бит заголовка представляется единицей (есть сигнал) на одной из длин волн, в то время как на остальных $k-1$ каналах сигнала в это время нет. Таким образом, полное число различных конфигураций заголовка (максимальное число конечных узлов сети) составляет k^p . Для требуемой коммутации всего мультиплексного канала коммутатор устанавливает биты заголовка в соответствующее состояние. Завершение передачи пакета происходит посредством передачи сигнала "Сброс" на специальной длине волны, выделенной исключительно для этой цели. Поскольку сеть прозрачна по отношению к формату поля данных, то это поле может охватывать как одну интегрированную многоволновую передачу, так и множество не связанных между собой передач по индивидуальным каналам. В первом случае необходима синхронизация между полями данных различных каналов, во втором – такая син-

хронизация необязательна. Ограничением SWANET являются дисперсия и поперечные помехи.

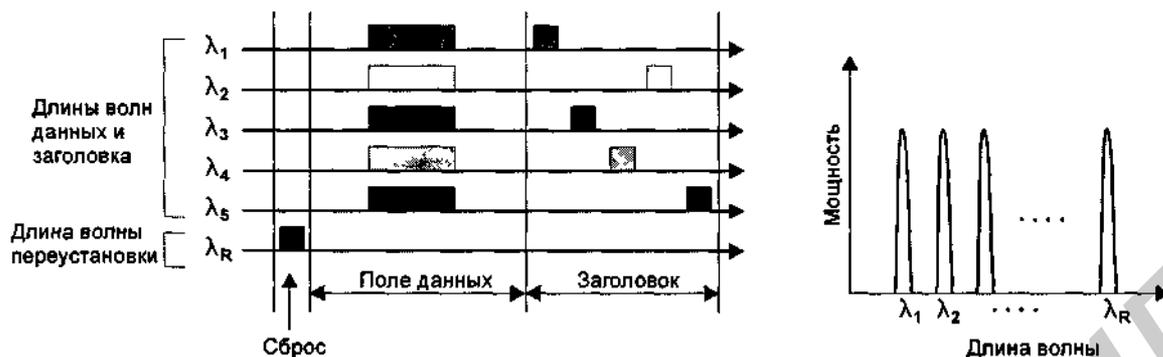


Рис. 8.23. Структура пакета в сети SWANET [30]

Сеть с параллельной битовой коммутацией

Две различные техники кодирования предложены для реализации сетей с *параллельной битовой коммутацией* BPPS (bit-parallel packet switching): техника *мультиплексирования поднесущих* SCM (sub-carrier multiplexing) и техника *многоволновой BPPS*. Обе техники используют отдельные каналы в одном и том же волокне для передачи данных и собственно заголовка, на основании которого происходит переключение состояний коммутаторов. Заголовок пакета передается теперь не последовательно, когда он предшествовал передаче поля данных пакета, а параллельно с данными, что позволяет увеличить пропускную способность.

В технике SCM данные и заголовок кодируются как две различные поднесущие оптического носителя и далее передаются одновременно (рис. 8.24 а). SCM позволяет эффективно использовать имеющийся спектр за счет ограничений битовой скорости, которая должна быть меньше, чем частота поднесущей. Таким образом, техника SCM полезна когда весь спектр сигнала данных ограничен, т. е. битовая скорость данных не очень высока.

SCM имеет ряд ограничений применительно к полностью оптическим сетям. Главное из них связано с невозможностью избежать сложных электронных преобразований поднесущих заголовка и данных в коммутаторе, так как перед началом коммутации данные и заголовок должны быть демultipлексированы. Второе ограничение связано с характером распространения сложного сигнала по волокну. Поскольку заголовок и данные мультиплексированы в канал одной и той же несущей частоты, то передатчик, имеющий ограниченные ресурсы, должен обеспечить достаточную мощность для каждого сигнала, что уменьшает мощность сигналов по отдельности.

Модификацией SCM является метод, при котором данные передаются на основном носителе, а заголовок мультиплексируется на поднесущую. В этой технике частота поднесущей не ограничивает битовую скорость передачи данных. Поскольку заголовок не требует высокой битовой скорости передачи, то для него предельное соотношение сигнал/шум может быть значительно ниже, что допускает без ущерба большее затухание сигнала в волоконно-оптической линии. Данный метод демонстрировался для скорости передачи данных 2,5 Гбит/с и для заголовка 40 Мбит/с, который мультиплексировался на поднесущую шириной 3 ГГц [31].

Многоволновая параллельная битовая коммутация – это техника кодирования, при которой для данных и для заголовка приписываются различные наборы длин волн [32]. В отличие от традиционного волнового мультиплексирования, где каждый пакет связан с определенной длиной волны, в этой технике пакет (как и заголовок) связывается с несколькими длинами волн (рис. 8.24 б).

Ряд особенностей делают эту технику более предпочтительной по сравнению с SCM для использования в полностью оптических сетях. Во-первых, простая оптическая фильтрация волновых каналов выполняется легче, чем радиочастотное выделение поднесущих. Во-вторых, можно выполнить кодирование заголовка, так что заголовок будет распознаваться коммутатором, а коммутация будет происходить на пакетных скоростях вместо скоростей данных. И, наконец, поскольку отдельные источники излучения используются для каждой длины волны, то не возникает проблемы, связанной с потерей мощности.

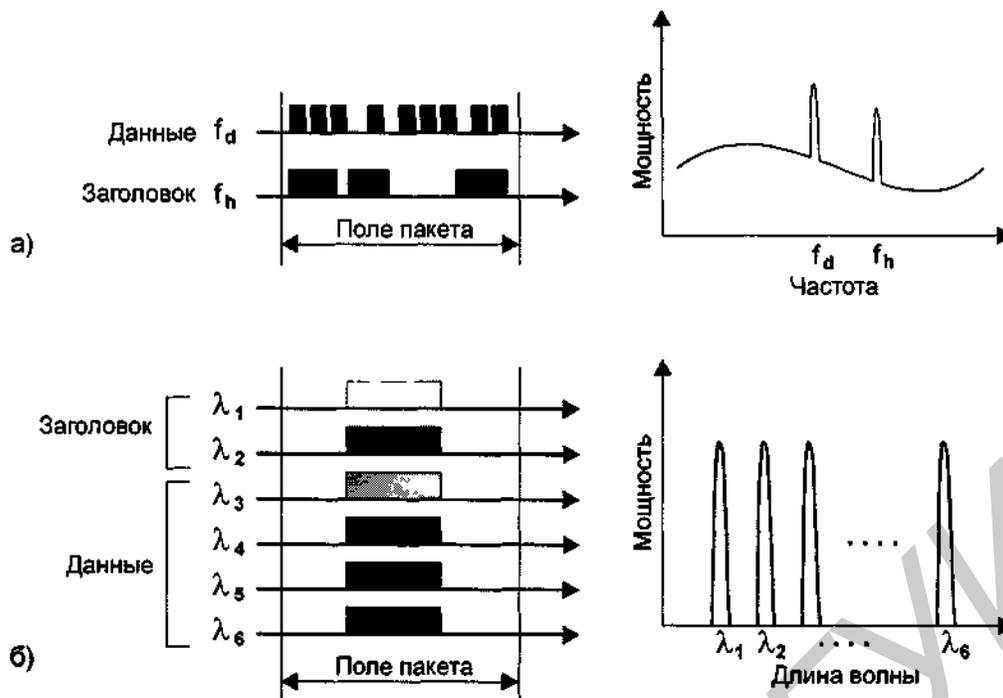
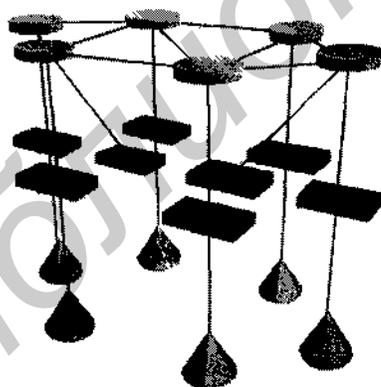


Рис. 8.24. Структура пакета в сетях: а) с техникой мультиплексирования поднесущих; б) с техникой многоволновой параллельной битовой коммутации

8.10. Архитектура AON

Полностью оптические сети могут строиться на любом масштабе: от локального, например объединяя парк суперкомпьютеров, до глобального, где в перспективе они, безусловно, займут место главных магистралей. Общая структура глобальной информационной сети может быть весьма разнообразной, столь же разнообразной, как и число различных приложений, которые в ней используются [2]. Положение оптического уровня или уровня полностью оптической сети в контексте архитектуры глобальной сети показано на рис. 8.25. В самом оптическом уровне, который, в общем случае, имеет иерархическую структуру, выделяют три подуровня Уровень-0, Уровень-1 и Уровень-2 (рис. 8.26).



Оптический уровень (полностью оптическая сеть)
 Динамическая транспортная реконфигурация
 Волновое мультиплексирование
 Восстановление пути на высоком уровне

Уровень SDH (ATM, Gigabit Ethernet, ...)
 Высокоскоростная защита передачи
 Временное мультиплексирование
 Синхронизация

Уровень служб
 Доставка данных до конечного пользователя

Рис. 8.25. Оптический уровень как всеобъемлющая структура глобальной сети

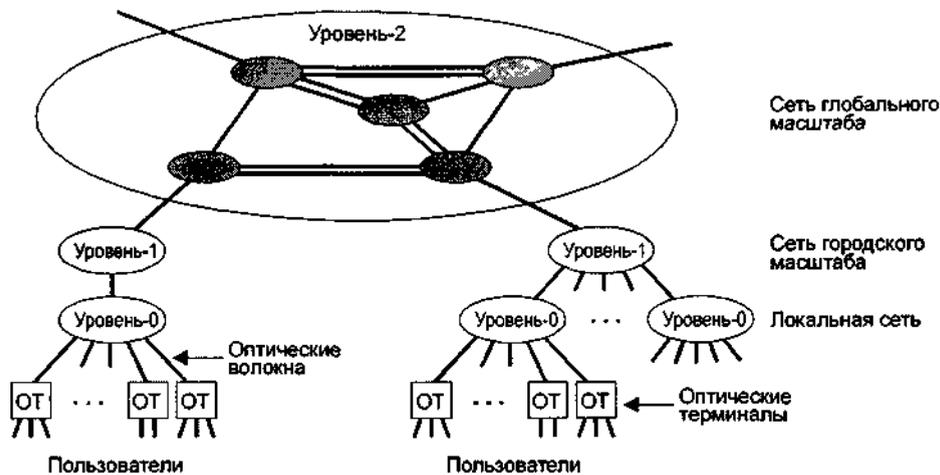


Рис. 8.26. Структура оптического уровня

Оптический терминал ОТ – это узел сети, на котором завершаются владения AON. На этом узле поступающие сигналы стандартных приложений преобразуются в форму, предназначенную для обработки промежуточными узлами полностью оптической сети. На этом узле еще допускаются оптоэлектронные преобразования.

Пример 1 работы ОТ: входящий электрический сигнал 100Base-TX дуплексного канала Fast Ethernet преобразуется в оптический сигнал на определенной длине волны из окна 1,55 мкм.

Пример 2: на оптический терминал поступает несколько оптических сигналов ATM (622 Мбит/с) по многомодовому волокну на длине волны 1,33 мкм, которые преобразуются в гребенку разных длин волн в соответствии с частотным планом.

Оптический терминал должен оснащаться узкополосными лазерами. В него могут быть интегрированы другие элементы полностью оптической сети, например, перестраиваемые оптические фильтры, системы волнового мультиплексирования и др.

Уровень-0. Этот уровень определяет пассивную ширококонтурную AON локального масштаба с небольшим (до нескольких десятков) числом оконечных узлов сети. Характерными элементами, организующими сеть этого уровня являются оптические комбайнеры/разветвители, фильтры. Элементы сети Уровня-0 напрямую взаимодействуют с оптическими терминалами, и с элементами сети Уровня-1, если таковые имеются. Примером служить сеть Rainbow-1. Вариант подключения элементов сети в пределах Уровня-0 показан на рис. 8.27.

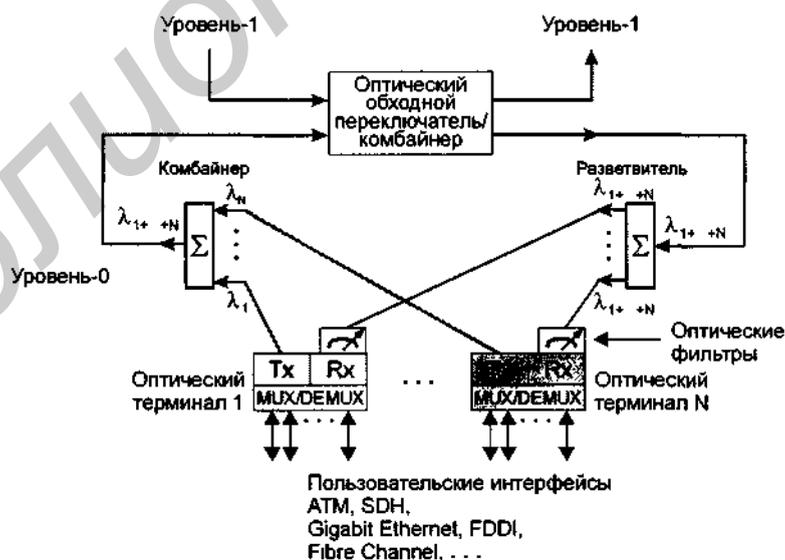


Рис. 8.27. Пример структуры уровня 0

Уровень-1. Этот уровень определяет AON с пассивной волновой маршрутизацией. Характерными элементами этого уровня являются устройства волнового мультиплексирования и демультимплексирования. Вариант подключения элементов сети в пределах Уровня-1 показан на рис. 8.28.

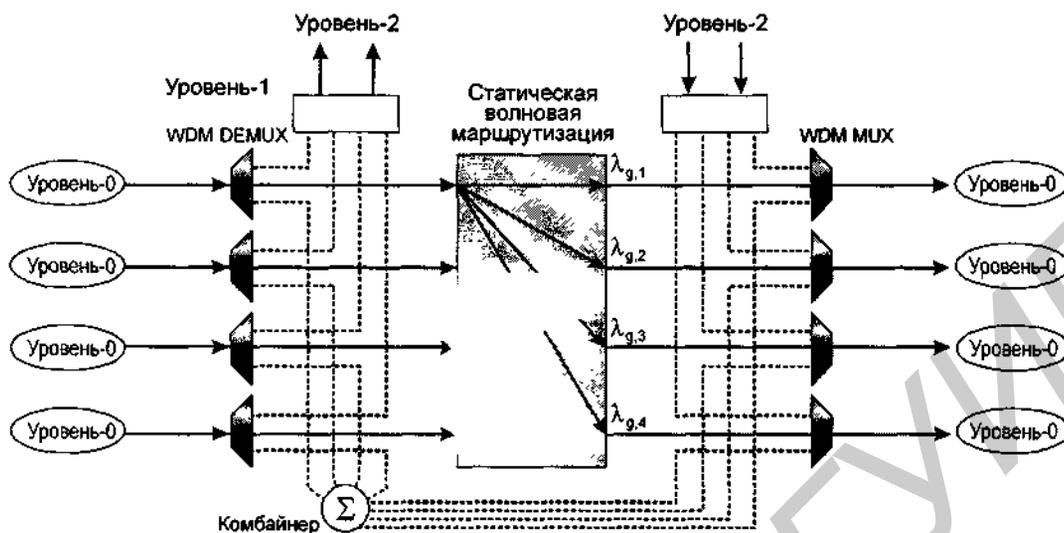


Рис. 8.28. Пример построения уровня 1

Уровень-2. Этот уровень определяет AON, допускающую активную волновую маршрутизацию. Характерными элементами этого уровня являются устройства волнового мультиплексирования и демультимплексирования, волновые конвертеры и оптические коммутаторы. Коммутация может происходить либо на основе чтения заголовков пакетов (AON с коммутацией пакетов), либо на основе внешнего управления (AON с активной коммутацией каналов). Только на основе узлов Уровня-2 можно строить масштабируемые полностью оптические сети глобального масштаба. Обобщенный вариант подключения элементов сети в пределах Уровня-2 показан на рис. 8.29. Разберем работу узла Уровня-2.

Оптический сигнал в каждом входном канале (одно волокно) представлен в виде множества различных длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ – один и тот же набор длин волн используется для всех входных и выходных каналов. Волновой демультимплексор (WDM DEMUX) выделяет сигналы на разной длине волны, приходящие от одного канала, и направляет их в отдельные волокна. Оптические сигналы от разных демультимплексоров одной и той же длины волны попадают на входные порты-полюсы оптической коммутационной матрицы (или коммутатора), соответствующей этой длине волны – ранее было показано, что коммутацию легче проводить среди сигналов одной и той же длины волны. Коммутаторы выполняют функцию диспетчеров, перенаправляя потоки на разные выходные порты по задаваемой схеме и сохраняя несущую длину волны. Если информационный сигнал приходит на узел на одной длине волны, а должен покинуть этот узел на другой длине волны, следует использовать волновые конвертеры.

Дополнительный элемент, который может входить в состав каждого из рассмотренных трех уровней – это оптический усилитель EDFA.

8.11. Прототипы и коммерческие реализации AON

В настоящее время исследовательские работы, а также работы по реализации проектов оптических сетей ведутся многими производителями сетевого и телекоммуникационного оборудования, из которых следует выделить: IBM, консорциум AON (All-Optical Networking), объединяющий AT&T, DEC, MIT Campus, MIT Lincoln Lab (США); группу компаний ACTS Photonic Technologies Area, объединяющую Alcatel Alsthom Recherche, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, France Telecom-(CNET), Royal Institute of Technology, University College of London,

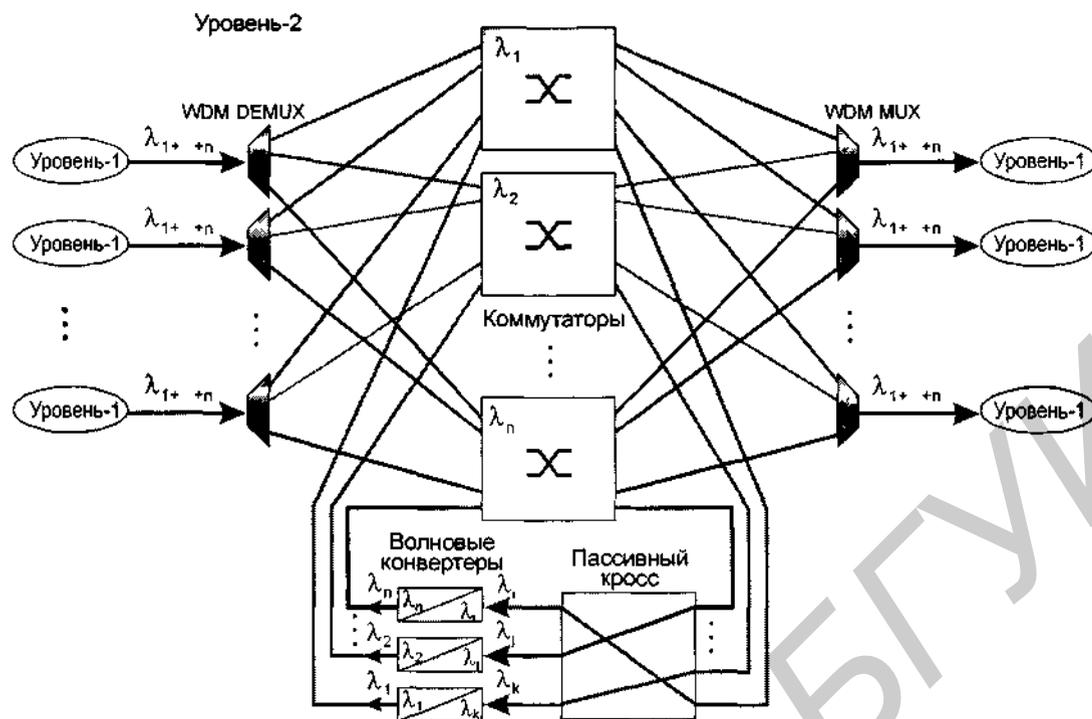


Рис. 8.29. Общий пример построения уровня 2

Перечислим крупные международные проекты сетей AON, реализующиеся в настоящее время [18, 29]:

- Проект VERTICAL (VERTical cavity laser Technology for InterConnection and AccessLinks), целью которого является разработка длинноволновых 1,3 / 1,55 мкм лазеров с вертикальной полостью поверхностного излучения, работающих при комнатной температуре на основе оптимизации электрических и термических свойств структуры.
- Проект WOTAN (Wavelength-agile Optical Transport and Access Network), целью которого состоит в том, чтобы обеспечить соединения по принципу "точка-точка" на основе применения скоростных коммуникационных систем связи для нужд общественных телекоммуникационных сетей. За счет большого количества близко расположенных волновых каналов предполагается значительно увеличить пропускную способность сети и повысить гибкость управления ею.
- Проект BROADBAND (Broadband Loop), целью которого – проведение испытаний концепций недорогих широкополосных сетей абонентского доступа с доведением волокна в локальный узел по мере роста потребностей в полосе пропускания.
- Проект PLATO (Photonic Links in Atm and Optical systems).
- Проект KEOPS (KEys to Optical Packet Switching), главной целью которого является анализ и достижение высоких скоростей переключения при пакетной коммутации в пределах полностью оптической сети связи.
- Проект UPGRADE (High Bitrate 1300nm Upgrade of the European Standard Single-Mode Fibre Network).
- Проект PHOTOS (PHOTOSensitive Technology for Optical Systems).
- Проект CAPITAL (Customer Access Photonics and Integrated Technology for Active Low cost Devices).
- Проект PLANET (Photonic Local Access NETwork).
- Проект MIDAS (Multigigabit Interconnection and Advanced techniques).

- Проект HORIZON (Horizontal action transport networks).
- Проект FAST (Fluoroaluminate Amplifiers for Second Telecom window).
- Проект ESTHER (Exploitation of Soliton Transmission Highways for European Ring).
- Проект BLISS (Broadband Lightwave Sources and Systems).
- Проект OPEN (Optical Pan-European Network) разрабатывает концепцию Пан-Европейской сети, в которой крупнейшие европейские города соединяются волоконно-оптическими линиями связи со сверхвысокой пропускной способностью. Сеть использует методы спектрального разделения и позволяет осуществить гибкую взаимосвязь европейских национальных сетей. К главным целям относятся разработка спецификации и определение размера сети и ее элементов, разработка и испытание опытного образца многоволнового оптического переключателя.
- Проект HIGHWAY (Photonic Technologies for Ultra High Speed Information).
- Проект COBNET (Corporate Optical Backbone Network), основной целью которого является разработка архитектурной и технологической концепций корпоративных (вневедомственных) сетей на основе использования преимуществ оптических ATM технологий.
- Проект METON (Metropolitan Optical Network), основная цель которого состоит в разработке оптической транспортной городской сети SDH на основе использования различных топологий с применением спектрального разделения, оптических мультиплексоров и коммутаторов ATM.
- Проект FOTON (Pan-European Photonic Transport Overlay), главной целью которого провозглашена разработка оптической сети связи для будущей Пан-Европейской транспортной сети. Важным аспектом разработки такой сети является попытка ее оптимизации по критерию "эффективность-стоимость" при условии высокой скорости передачи информации для существующих форматов сигналов, включая SDH и ATM.
- Проект MEPHISTO (Management of Photonic Systems and Networks) объявил основной целью реализацию принципов управления сетью (TMN) применительно к будущим полностью оптическим сетям, в которых метод спектрального разделения (WDM) используется как для увеличения скорости передачи, так и для решения задач маршрутизации.
- Проект MOON (Management of Optical Networks) преследует цель разработки концепции построения системы управления оптическим слоем будущей Пан-Европейской транспортной сети.

Литература к главе 8

1. All-Optical Networking Consortium: WDM Description, 1996, <http://www.ll.mit.edu/aon/aonwdm.html>
2. T. Krause. "Migration to All-Optical Networks". Alcatel Network Systems, 1998, <http://www.usa.alcatel.com/telecom/transpt/optical/techpaps/migration/>
3. Photonic Technologies Area: BillBoard, 1998, <http://www.intec.rug.ac.be/horizon/billboard.htm>
4. WDM Cross-Connect Technology, Oki Electric Industry, 1996, <http://www.oki.co.jp/OKI/RDG/English/kikaku/okayama/main.html>
5. Optical wavelength multiplexer/demultiplexer (Wavelength router). Oki Electric Industry Co., 1996, <http://www.oki.co.jp/OKI/RDG/English/kikaku/okayama/eWAG.html>
6. S. Cortez and M. Dickerson. "Enabling the all-optical network". America's Networks, 1998, http://www.americasnetwork.com/issues/98issues/980201/980201_optical.html
7. DWDM Channel Spacing: Do You Know How Much Capacity You're Really Getting? Alcatel Network Systems, 1998, <http://www.usa.alcatel.com/telecom/transpt/optical/techpaps/ad9804/>
8. MultiWave Sentry 4000: DWDM transport system. CIENA Corporation, 1998, <http://www.ciena.com/products/mwsentry4000.html>
9. Technical Application Note, No. OA1-001: Erbium-Doped Fiber Amplifiers in Networks. 1998, <http://www.ditechcorp.com/notes/An0a1.htm>
10. Волноводная оптоэлектроника, под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1991. – 575 с.

9. Сети абонентского доступа

В перспективе грядет доминирование цифровых систем передачи информации над аналоговыми. Однако в ближайшие годы наиболее выгодными с точки зрения цена-эффективность останутся решения смешанного типа, использующие как цифровую, так и аналоговую передачу данных. В телевизионных кабельных системах сегодня преобладает медный коаксиальный кабель, очевидными достоинства которого являются большая полоса пропускания при аналоговой передаче телевизионных каналов и относительно низкая стоимость оконечного оборудования. И хотя медный кабель постепенно сдает свои позиции, уступая дорогу волоконно-оптическому, за каждой средой связи остается своя область применения, а это означает дальнейшее сосуществование этих двух сред.

Несмотря на то, что никто не возьмется сказать, какие потребности в сетевых ресурсах будут у абонентов, строящиеся сети обязаны удовлетворить этим потребностям при минимальных затратах. Узкая полоса пропускания и широкая полоса, однонаправленный поток и полнодуплексный, широкоэмитательное телевидение и интерактивное видео, телефония и видеотелефония – все эти черты создают сложный выбор между сегодняшними службами и службами завтрашнего дня. На стремительно развивающемся рынке телекоммуникаций опасно принимать поспешные решения, а также задерживаться, дожидаясь появления какой-нибудь более универсальной технологии. Однако главная трудность в том, что с технологической точки зрения на данный момент существует великое множество стандартов для видеотрансляций, телефонии, сетей передачи данных, а технология ATM все еще остается очень дорогой, чтобы реально конкурировать и вытеснить традиционные сетевые решения, тем более в сетях абонентского доступа.

В данной главе дан обзор общих вопросов построения современных широкополосных абонентских сетей, охватывающих жилые зоны кварталов, районов города или сельской местности. На сегодняшний день для решения подобных задач разработано несколько концепций, учитывающих потребительские характеристики и платежеспособность абонентов. Практически все они используют в той или иной степени волоконно-оптические линии связи, которые значительно увеличивают пропускную способность и позволяют внедрять новые широкополосные службы. Наибольшее распространение получили три концепции: гибридная волоконно-коаксиальная сеть (HFC), концепция "волокно в уличный монтажный шкаф" (FTTC) и концепция "волокно в квартиру" (FTTH).

По прогнозам экспертов, к концу 1998 года объем продаж волоконно-оптических компонентов для широкополосных абонентских сетей составит 2/3 от полного объема продаж, который, как ожидается, выйдет на уровень 12 млрд. долл.; а концу 2003 года соотношение еще больше увеличится и составит уже 3/4 при полном объеме продаж 30 млрд. долл. [1].

9.1. Концепции развития абонентских сетей

Одним из факторов, подчеркивающих эпоху телекоммуникационных революций, в которой мы живем, является непрерывный рост объемов передаваемой информации. Причем не предвидится уменьшение темпов роста по крайней мере в ближайшие 5-10 лет. Из табл. 9.1 видно, как стремительно возрастает полоса пропускания по мере появления новых и новых медиа-приложений. Это обязывает новые абонентские сети, строящиеся сегодня, иметь запас по наращиванию, т.е. достаточно большую полосу пропускания каналов. Поэтому, не зависимо от того, планируется ли строить сеть с нуля, или выполнять ее наращивание, необходимо учитывать еще и дальнейшие наращивания сети.

Было бы ошибкой представлять современную абонентскую сеть, как некую застывшую структуру. Скорее это – непрерывно развивающийся организм. Сеть может строиться с нуля (например, при обустройстве новой жилой зоны), либо наращиваться (т.е. добавляются новые службы, например интерактивное телевидение, закрытые частные каналы кабельного телевидения и т.д.). Каким наилучшим образом строить абонентскую сеть или производить ее наращивание зависит от множества факторов, среди которых: концентрация абонентов в жилой зоне, приоритетность в соответствующих услугах, степень их распределения среди абонентов, наличие спутникового и эфирного телевидения, состояние существующей кабельной системы, объем необходимых капиталовложений и др.

Таблица 9.1. Требования к полосе пропускания для различных медиа-приложений

Приложение	Тип передачи	Формат передачи	Структура передачи	Скорость передачи без сжатия	Скорость передачи со сжатием
Речь и музыка	Телефония		8 Ко/с × 8 бит/о*	64 кбит/с	8-32 кбит/с
	Телеконференции		16 Ко/с × 8 бит/о*	128 кбит/с	48-64 кбит/с
	CD-аудио		44,1 Ко/с × 16 бит/о*	705,6 кбит/с	128 кбит/с
Изображение	Изображение обычного разрешения	SVGA	640 пикс/лин × 480 лин/с × 8 бит/пикс	2,458 Мбит/с	24-245 кбит/с
		JPEG	720 пикс/лин × 576 лин/с × 16 бит/пикс	6,636 Мбит/с	104-830 кбит/с
	Изображение высокого разрешения		1280 пикс/лин × 1024 лин/с × 24 бит/пикс	31,46 Мбит/с	300 кбит/с-3 Мбит/с
Бизнес-видео	Видеофон	QCIF (H.261)	176 пикс/лин × 144 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с**	9,115 Мбит/с	ρ × 64 кбит/с (ρ = 1, 2)
		MPEG-4 (H.320)	176 пикс/лин × 144 лин/к × 12 бит/пикс × 10 к/с	3,04 Мбит/с	64 кбит/с
	Видеоконференции	CIF (H.261)	352 пикс/лин × 288 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с***	36,45 Мбит/с	m × 368 кбит/с (m = 1, 2, 3, 4, 5)
		MPEG-1 (PAL)	352 пикс/лин × 288 лин/к × 12 бит/пикс × 25 к/с***	30,4 Мбит/с	1,15-3 Мбит/с
		MPEG-1 (NTSC)	352 пикс/лин × 240 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с***	30,4 Мбит/с	1,15-3 Мбит/с
Развлекательное видео	VCR	CIF (MPEG-2)	352 пикс/лин × 240 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с***	30,4 Мбит/с	4 Мбит/с
	Широковещательное телевидение	MPEG-2 (PAL)	720 пикс/лин × 576 лин/к × 12 бит/пикс × 25 к/с***	124,4 Мбит/с	15 Мбит/с
		MPEG-2 (NTSC)	720 пикс/лин × 480 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с***	124,3 Мбит/с	15 Мбит/с
	Телевидение высокого разрешения	HDTV	1920 пикс/лин × 1080 лин/к × 16 бит/пикс × 30 к/с***	994,3 Мбит/с	135 Мбит/с
		MPEG-3	1920 пикс/лин × 1080 лин/к × 12 бит/пикс × 30 к/с***	745,8 Мбит/с	20-40 Мбит/с

* о – образец, ** к – кадр

*** скорость кадров может быть 30, 15, 10 и 7,5 к/с

пикс – пиксел

лин – линий

CIF (common intermediate format) –

общий промежуточный формат

QCIF (quarter common intermediate format) –
 кварталный обобщенный промежуточный формат
 MPEG (moving pictures expert group) – набор стандартов, обеспечивающих передачу переменного сжатого видеоизображения
 JPEG (joint photographic expert group) – стандарт сжатия видеокадра, разработанный группой экспертов

Основными видами телекоммуникационного сервиса, доступного в настоящее время, являются:

- телефония аналоговая, (менее массовые в России цифровая, ISDN);
- телевидение широковещательное (эфирное), кабельное.

Более редкие реализации:

- непосредственный прием передач от спутника;
- использование существующего телефонного канала для подключения домашнего ПК к сети Internet (электронная почта, низкоскоростной доступ к банкам информации).

Стремительно развивающийся процесс информатизации общества говорит о том, что как приведенные более редкие службы, так и новые службы, которые практически не развиты сегодня, в скорой перспективе найдут массового потребителя. Перечислим основные телекоммуникационные службы завтрашнего дня:

- традиционная телефония (аналоговая и цифровая);
- традиционное широкоэмитательное (эфирное), кабельное и спутниковое телевидение;
- цифровое кабельное телевидение (с использованием алгоритмов сжатия MPEG-2, MPEG-3);
- интерактивное телевидение и "закрытые" видеоканалы;
- подключение к сети Internet по скоростным каналам, минуя телефонную сеть (видео-конференции, быстрый доступ к банкам данных и т.д.).

Традиционная информационная абонентская сеть

На рис. 9.1 показана общая схема построения традиционной абонентской сети. Головная телевизионная станция принимает телевизионные спутниковые и эфирные каналы, а также каналы от локальной студии кабельного телевидения, выполняет их частотное мультиплексирование и направляет комбинированный широкополосный спектральный сигнал по *магистральному коаксиальному кабелю (trunk coax)* – такой поток телевизионных передач от головного узла к абонентам принято называть *нисходящим потоком*. От магистрального кабеля на узлах ответвления – *ответвителях (tap)* – могут отделяться один или несколько ответвленных коаксиальных кабелей – *коаксиальных ветвей (feeder coax)* – при этом ответвитель может содержать встроенный распределительный усилитель. Дальнейшее ответвление кабель испытывает, приходя в абонентский ответвитель, от которого непосредственно в квартиры абонентов следуют *спадающие коаксиальные кабели (drop coax)*. Медные телефонные многопарные кабели прокладываются от районной АТС до уличных телефонных шкафов, установленных в жилых зонах, в каждом из которых происходит кроссирование витых пар кабеля от АТС и кабелей от абонентов. Итак, во-первых, в такой сети абоненты обеспечиваются возможностью приема телевизионных каналов. Во-вторых, абоненты обеспечиваются телефонным сервисом, который в отличие от телевидения является двунаправленным.

Хотя традиционные абонентские сети будут заменяться новыми сетями, например HFC, они все еще обеспечивают очень большую инсталляционную базу. Максимальное расстояние от головного узла до самого удаленного абонента составляет 10-15 км. Максимальное число каскадов усилителей – 35, максимальное число абонентов, которые могут быть подключены к одному магистральному коаксиальному кабелю, – 125000.

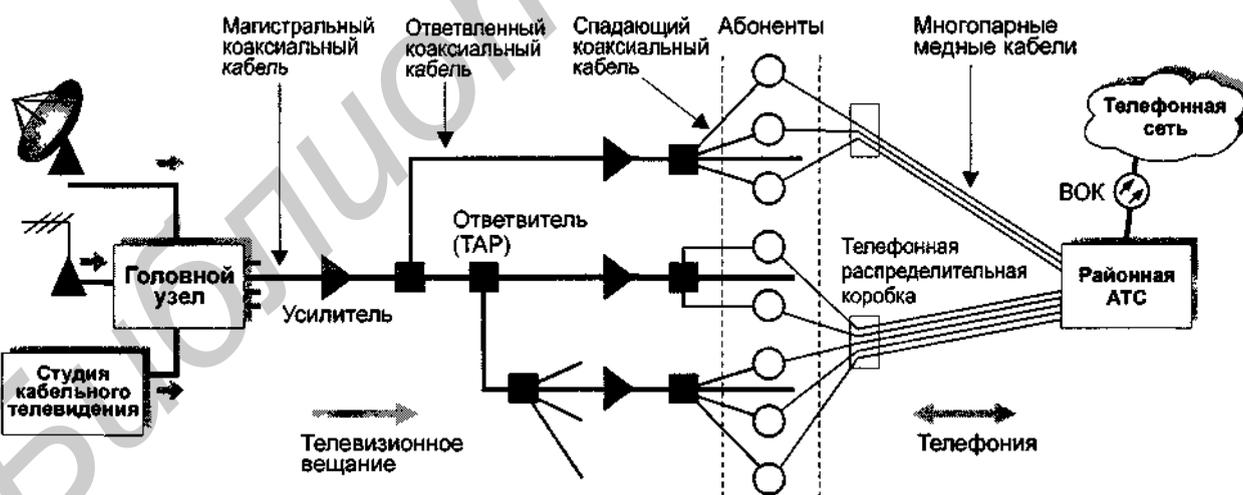


Рис. 9.1. Архитектура традиционной абонентской сети доступа

Основной недостаток данной сети – это ограниченные возможности для реализации двунаправленных служб (видеотелефонии, видеоконференций и т.д.). Полоса пропускания витой пары, длина которой может достигать нескольких километров, очень низкая. Приемлемой может быть скорость 33,6 кбит/с. Большие скорости – 56 кбит/с (новый внедряемый стандарт V.90), и 128 кбит/с для сетей ISDN (BRI) – будут доступны значительно меньшему проценту абонентов в силу двух причин: с одной стороны, из-за низкой пропускной способности витых пар, с другой стороны, из-за высокой цены, которую нужно платить за ISDN подключение.

Отдельные организации могут использовать существующие витые пары для подключения к узлу Internet провайдера по модемной связи на основе технологии HDSL. Но это скорее решает частную проблему.

Гибридная волоконно-коаксиальная сеть

Гибридная волоконно-коаксиальная сеть HFC (hybrid fiber/coax) строится на основе коаксиальной и волоконно-оптической кабельных систем и использует лучшие черты каждой из них (рис. 9.2). Сеть HFC менее дорогая по сравнению с сетью, в которой волокно идет непосредственно в каждый дом (концепция FTTH) – только средние и крупные предприятия могут позволить себе доведение волокна непосредственно до офиса. В то же время сеть HFC предоставляет значительно больше услуг, чем традиционные чисто коаксиальные телевизионные сети. К таким услугам относятся: видеосервис, телефония, интерактивные службы, службы передачи данных и др. [2].

Назначение волокна в сетях HFC во многом то же, что и в телефонных сетях, где на основе ВОК строятся более протяженные магистральные линии связи между районными и городскими АТС. В сетях HFC максимальная длина ВОК может достигать до 80 км. В типовой конфигурации монтируемые в стойку оптические лазерные передатчики (преимущественно на основе DFB лазеров) в центральном офисе или головном узле преобразовывают широкополосные радиочастотные сигналы в эквивалентные аналоговые оптические сигналы, которые следуют по ВОК до соответствующих оптических распределительных узлов ODN (optical distribution node). Оптический сигнал, приходя в ODN, вновь преобразовывается в электрический и далее следует по коаксиальным ветвям от конечных абонентов до абонентских ответвителей. Максимальное число усилителей в коаксиальной ветви варьируется от 4 до 10 в зависимости от архитектуры производителя. Максимальное число абонентов в расчете на один магистральный ВОК составляет от 500 до 3000.

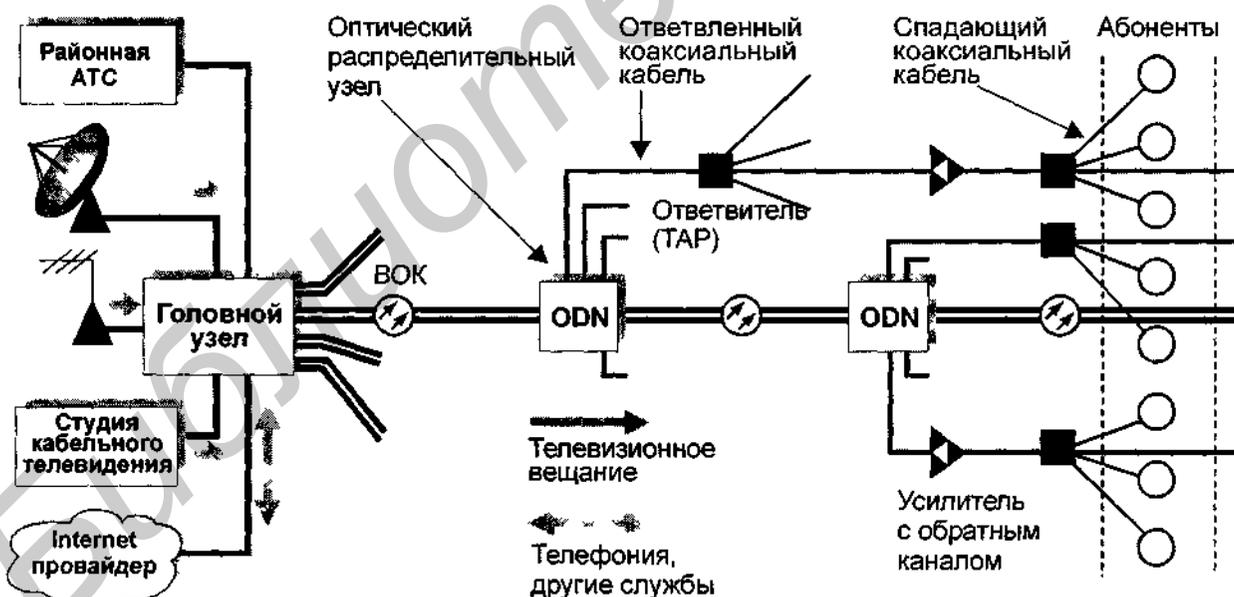


Рис. 9.2. Архитектура гибридной волоконно-коаксиальной сети абонентского доступа (HFC)

Принципиальным отличием таких сетей от традиционных коаксиальных абонентских кабельных сетей (наряду с тем, что добавлен волоконно-оптический тракт) является двунаправленный транспорт, то есть появляется поток от абонентов к головному узлу – *восходящий поток*.

Концепция "волокно в монтажный шкаф"

Концепция "волокно в монтажный шкаф" FTTC (fiber to the curb) обеспечивает один из простейших и менее дорогих способов наращивания сети и предоставления новых услуг абонентам (рис. 9.3). В FTTC волоконно-оптический кабель из центрального узла (районной АТС, или узла оператора услуг связи) приходит в монтажный шкаф (curb). Монтажный шкаф, который оснащается электронным распределительным оборудованием, может быть как уличного исполнения (тогда он должен отапливаться и, по возможности, быть герметичным), так и исполнения для установки внутри помещений. От шкафа к абонентам идут витые пары. В отличие от телефонных пар, эти витые пары имеют лучшие технические характеристики и значительно меньшую длину (до 100 м), что обеспечивает им значительно выше пропускную способность (до 100 Мбит/с и более). Поэтому открывается возможность новым интерактивным услугам, среди которых: Internet, видеоконференции, прием сжатых видеопередач в формате MPEG-2/MPEG-3 и т.д.

В этой концепции сохранена существующая коаксиальная кабельная система, посредством которой абоненты получают аналоговые телевизионные каналы.

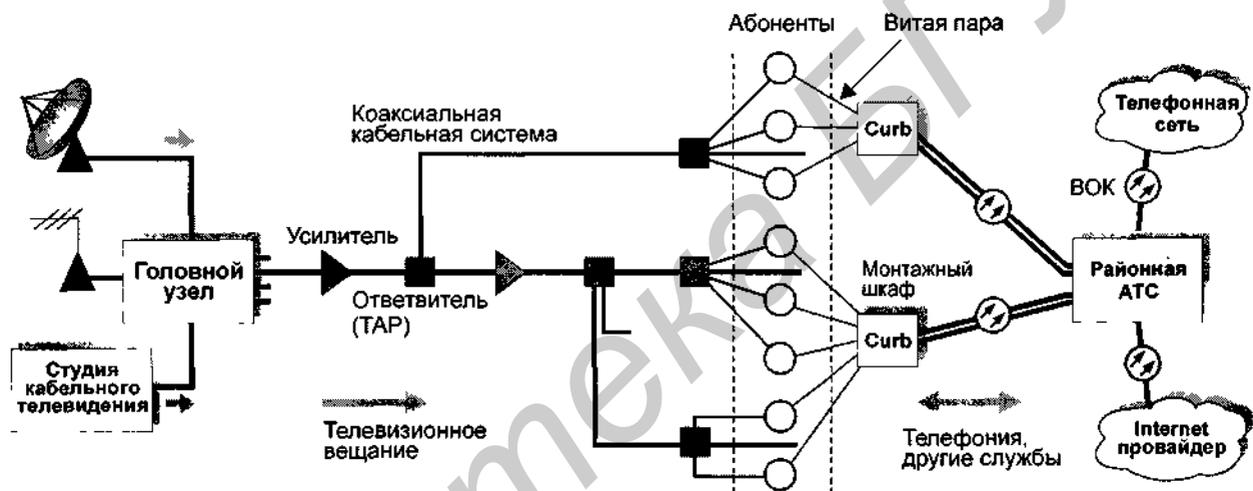


Рис. 9.3. Концепция "волокно в уличный монтажный шкаф" (FTTC)

Концепция "волокно в квартиру"

На сегодняшний день концепция "волокно в квартиру" FTTH (fiber to the home) безусловно является самой дорогой. Успех в ее развитии во многом зависит от того, как сильно будут снижаться стоимость волоконно-оптических компонентов, в особенности лазерных передатчиков, а также расценки на установку таких кабельных систем. Наиболее сильно концепция FTTH прорабатывается в Японии [1], хотя и там она занимает третье место после HFC и FTTC.

В этой концепции волокно от головного узла следует непосредственно в квартиру абонента (рис. 9.4). На пути могут устанавливаться пассивные оптические распределительные кроссы, которые "дробят" многожильные ВОК в кабели с меньшим числом волокон, в частности, двухжильные.

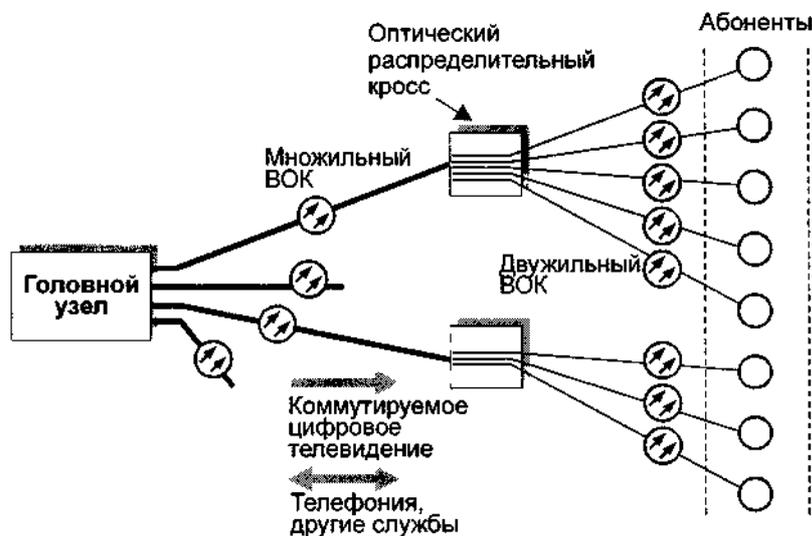


Рис. 9.4. Концепция "волокно в квартиру" (FTTH)

9.2. Сети HFC

Сеть HFC предполагает установку взаимосогласованного оборудования на головном узле (HC, headend controller, головной контроллер), на оптическом распределительном узле (ODN) и на абонентской стороне (ISU, integrated service unit, абонентское устройство). В настоящее время идет разработка стандарта IEEE 802.14, определяющего методы доступа к сетям кабельного телевидения – MAC уровень (в особенности это касается сетей HFC), а также регламентирующего спецификации физического уровня, систему сигнализации и протоколы взаимодействия с локальными и глобальными сетями передачи данных [5]. Несмотря на то, что стандартизация пока еще не завершена, многие компании, специализирующиеся в сфере производства телекоммуникационного сетевого оборудования, уже несколько лет поставляют большой перечень оборудования, имея крупные контракты с операторами услуг связи на развертывание сетей HFC. Наиболее продвинутые решения предоставляют компании: ADC Telecommunications, Motorola, Nortel, NTT, Scientific Atlanta, Warner Cable [4, 5]. Отсутствие единого стандарта не противоречит строительству HFC сетей. Во-первых, они обеспечивают универсальные транспортные решения, жестко привязываясь к выработанному частотному плану для нисходящих и восходящих потоков в соответствии со стандартами сетей широкоэмительного телевидения. Во-вторых, заложены возможности по наращиванию сети, в частности, использование диапазона верхней части спектра до 1 ГГц.

Спецификации физического уровня стандарта 802.14

Спецификации физического уровня 802.14 поддерживают асимметричную двунаправленную передачу сигналов по сети HFC. Сеть HFC допускает для нисходящих потоков соединения типа "точка-множество точек" с обобщенной топологией доступа разветвленного дерева, а для восходящих потоков соединения типа "множество точек-точка" – с топологией шинного доступа.

Передача нисходящего потока формируется контроллером HC и является широкоэмительной, т.е. обязательной для приема всеми абонентскими устройствами. Передачи восходящего потока формируются устройствами ISU на абонентской стороне и достигают HC по общей распределенной коаксиальной среде.

Одна из важных задач, которая решается в рамках стандарта 802.14 – это поддержка протоколом MAC различных типов трафика. В отличие от многих других стандартов сетей, сеть HFC должна поддерживать три главные службы [1, 6]:

- постоянная битовая скорость (CBR);
- переменная битовая скорость (VBR);
- доступная битовая скорость (ABR).

Эти службы имеют несколько различных атрибутов, в частности, допустимые задержки, "взрывной" характер трафика. Одни приложения асимметричны по природе, например телевизионные трансляции. Другие приложения, наоборот, строго должны быть симметричными: голосовая связь, видеотелефония. Все эти требования учитывались при создании наиболее оптимального протокола.

Частотное распределение потоков

Общая схема частотного распределения потоков показана на рис. 9.5. Как видно, первоначально предполагается использовать область частот от 5 до 862 МГц, а в перспективе и область от 862 МГц до 1 ГГц. Под традиционное аналоговое телевидение отводятся частоты от 50 до 550 МГц. В России принята телевизионная частотная сетка с выделением полосы 8 МГц на каждый телевизионный канал. Спектр от 550 до 862 МГц может использоваться для передачи цифровых широкоэмитательных телевизионных передач, передаваемых в формате MPEG-2/MPEG-3, для организации видео и обычной телефонии, а также для трансляции закрытых каналов "видео по требованию" VOD (video on demand) и интерактивного видео.

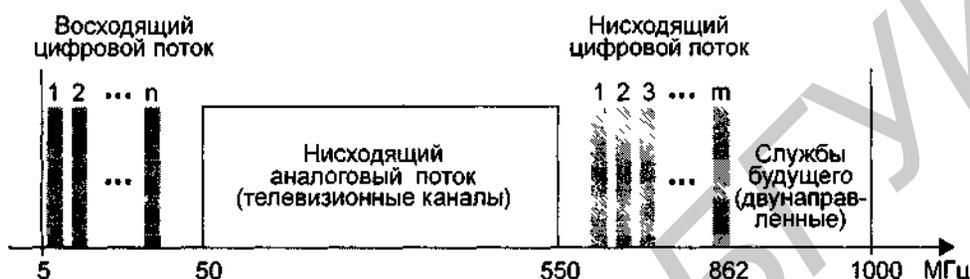


Рис. 9.5. Частотное распределение потоков в коаксиальной ветви

Распределение восходящих потоков

Несущие частоты f_c должны удовлетворять условию:

$$\left(f_{\min} + (1 + \alpha) \cdot \frac{R_s}{2} \right) < (f_c = n \cdot (40 \text{ кГц})) < \left(f_{\max} - (1 + \alpha) \cdot \frac{R_s}{2} \right),$$

где выравнивающий фактор (roll-off factor) $\alpha = 0,25$, n – целое, R_s – символьная скорость передачи на несущей частоте, а f_{\min} и f_{\max} определяются из табл. 9.2.

Таблица 9.2. План восходящих цифровых потоков для зоны "sub-split"

Регион	f_{\min} (МГц)	f_{\max} (МГц)
Северная Америка	5	42
Европа	5	65
Япония	5	55

Некоторые предприятия по производству коаксиального кабеля намереваются стандартизировать для восходящего цифрового потока еще две расширенные зоны "mid-split" и "high-split" с частотными окнами от 5 до 108 МГц и от 5 до 174 МГц соответственно.

Частотное распределение для восходящих потоков должно быть приписано контроллеру головного узла, с учетом того, что спектральная полоса на канал зависит от используемой скорости передачи символов. При этом минимальный размер спектральной полосы на канал должен быть равен $(1 + \alpha) \cdot R_s$. Условие исключения перекрытия двух соседних каналов с не-

сущими частотами f_{c1} и f_{c2} ($f_{c2} > f_{c1}$) и соответствующими символьными скоростями R_{s1} и R_{s2} записывается как:

$$f_{c1} + \left((1 + \alpha) \cdot \frac{R_{s1}}{2} \right) = f_{c2} - \left((1 + \alpha) \cdot \frac{R_{s2}}{2} \right).$$

На практике выбор частотного размещения каналов зависит от ряда факторов (как, например, избежание перекрытий при доступе, вводимая и теряемая мощность) и не регламентируется стандартом 802.14.

Распределение нисходящих потоков

Окно, в котором допускается размещение нисходящих цифровых потоков, различается для трех регионов (табл. 9.3). Большой размер окна не означает, что можно свободно использовать любой участок спектра. Необходимо учитывать, что в этот же спектральный диапазон попадают аналоговые телевизионный каналы, частотное размещение которых строго определено телекоммуникационным законодательством государства.

Таблица 9.3. План нисходящих цифровых потоков

Регион	f_{\min} (МГц)	f_{\max} (МГц)
Северная Америка	88	860
Европа	110	862
Япония	90	770

Физические особенности восходящих и нисходящих потоков

Использование модуляционных схем на основе квадратурной амплитудной модуляции QAM-64 и QAM-256 позволяет передавать нисходящие цифровые каналы со скоростью 30-40 Мбит/с, что возможно благодаря низкому уровню шума. Обратный восходящий цифровой поток использует более помехоустойчивые модуляции QAM-16 и/или квадратурно-фазовую модуляцию QPSK, так как, будучи размещенным в низкочастотной части спектра, сильнее подвержен влиянию шума. QPSK позволяет передавать потоки полосой до 2-10 Мбит/с. Почему же восходящий поток размещается в нижней части спектра (5-45 МГц)? Прежде всего, это связано с асимметричностью нисходящего и восходящего потоков. Для увеличения общей (суммарной в обоих направлениях) пропускной способности, меньший по величине поток следует размещать в области спектра с большей избыточностью кода.

Как следствие, размещение восходящего потока в нижней части спектра позволяет использовать в коаксиальных ветвях не только двунаправленные усилители, но и усилители с обратным каналом, которые в прямом направлении усиливают сигнал, а в обратном пропускают его без изменения. Поскольку затухание сигнала в коаксиальном кабеле значительно меньше в низкочастотной области спектра, то это позволяет сигналу от абонента дойти до приемника на ODN без промежуточного усиления при сохранении необходимой мощности на приеме.

Три типа физического уровня PHY для нисходящих потоков А, В и С поддерживаются стандартом 802.14 (табл. 9.4). Тип С идентичен типу А за главным исключением, что тип А использует канал размером 8 МГц (PAL/SECAM), а тип С – 6 МГц (NTSC). Основное отличие типов А и С от В состоит в методе кодирования.

Таблица 9.4. Основные параметры физического уровня для трех типов нисходящих потоков: А, В, С

Параметры	А		В		С	
Номинальная полоса, МГц	8		6		6	
Метод кодирования для коррекции ошибок	блочное RS-кодирование (RS – Reed-Solomon)		усеченное кодирование с внешним RS-кодом		блочное RS-кодирование	
Модуляция	QAM-64	QAM-256	QAM-64	QAM-256	QAM-64	QAM-256
Несущая частота f_c , кГц	$(n \cdot 250) \pm 30$		$(n \cdot 250) \pm 30$		$(n \cdot 250) \pm 30$	
Выравнивающий фактор, α	0,15		0,18	0,12	0,13	
Символьная скорость R_s , Мсимволов/с	6,0-6,95		5,057-5,064	5,19-5,36	5,0-5,31	

Подводя итог вышеизложенному, сформулируем основные принципы, на которых строятся HFC сети, и тенденции их дальнейшего развития.

- Гибридная система: волоконно-оптический кабель плюс коаксиальный кабель и витая пара. Заложены постепенный переход к инфраструктуре FTTH с развитием технологической и экономической базы.
- Гибридная передача информации: аналоговая и цифровая. Допускается постепенный переход к использованию только цифровой передачи.
- Широкополосные асимметричные потоки: поток от головной станции к абоненту значительно превышает обратный. Допускается постепенная миграция к более симметричному трафику, когда возрастает объем восходящих потоков, в частности использование высокочастотной части спектра до 1 ГГц для двунаправленного сервиса.
- Распределенная архитектура сети: сетевые устройства устанавливаются на головной станции, с распределительным узлом на абонентской стороне. Возможно постепенное выравнивание интеллектуальности между элементами сети.
- Интегрированные потоки информации, охватывающие почти все ее типы: голос, видео, данные различных форматов. Стандартом IEEE 802.14 предусматривается переход к универсальному транспорту информации на основе технологии ATM.
- Интеллектуальное централизованное управление сетью, мониторинг, тестирование, распределенный доступ к управлению. Допускается перераспределение информационных потоков с дифференциацией потоков для организации услуг и потоков управления элементами сети.
- Живучесть: "гнездовая" структура с резервированием кабельной части сети и основного оборудования. Автоматическое переконфигурирование в случае аварии. Распределенные комплексные системы питания.

Как видно из перечисленных характеристик, сети HFC являются гибридом во всех смыслах: "оптика – медь"; "цифры – аналог"; "широкий диапазон – узкий диапазон"; "распределенность – централизация"; "универсальность данных – специальные протоколы". Таким образом, сеть HFC дает возможность постепенному переходу от традиционных абонентских сетей к более перспективным сетям, максимально используя существующую кабельную инфраструктуру и телекоммуникационное оборудование.

9.3. Платформа доступа Homework

Рассмотрение многих инженерных решений, технических характеристик легче проводить на основе конкретного оборудования. Это позволяет лучше понять все достоинства и недостатки сети HFC. Далее рассмотрена платформа доступа Homework™ фирмы ADC Telecommunications, [4].

Предоставляемые услуги

Основные виды услуг, предоставляемые платформой Homework, приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5. Услуги, предоставляемые платформой HomeWork

Телекоммуникационные услуги	Информационные и развлекательные услуги	Дополнительные услуги
Телефония Подключение к локальным и глобальным сетям Услуги Internet Выделенные цифровые каналы связи до 2-х мбит/с Видеоконференцсвязь	60 каналов эфирного телевидения 200 каналов "видео по требованию" (учебные программы, новости, видеобиблиотеки, информационные сводки, художественные фильмы, интерактивные игры и т.д.)	Контрольные датчики пожарной, охранной сигнализации контроля уровня воды в ванной и т.п. Удаленный контроль за объектом Расчетно-кассовое обслуживание с банками, магазинами и т.д.

Основные элементы архитектуры

Элементы архитектуры HomeWork охватывают все этапы доведения информационных каналов от головной станции через оптические распределительные узлы до абонентов:

1. Оборудование головной станции и центрального узла:

Оптические передатчики, приемники и трансиверы. Комбайнеры, модуляторы, шифраторы, мультиплексоры. Головной цифровой терминал (HDT). Элементы системы контроля и управления. Системы широкополосной беспроводной связи. Устройства пассивной оптики.

2. Оптические распределительные узлы (ODN):

Оптические узлы. Системы питания, оптические усилители, шкафы для размещения оборудования.

3. Оборудование, устанавливаемое на стороне абонента и непосредственно у абонента:

Устройства интегрированного сервиса для выделения цифровых каналов с преобразованием интерфейсов (ISU, модемы, мосты, маршрутизаторы, устройства преобразования форматов данных). Set-top-unit – для видеосервиса. Приемно-передающие устройства мобильной связи.

4. Волоконно-оптическая и коаксиальная кабельная системы:

Оптические передатчики. Устанавливаются на головной станции и преобразуют высокочастотный электрический сигнал в оптический с аналоговой модуляцией в диапазоне 50-750 (862) МГц. Передача осуществляется на длинах волн 1,3 мкм или 1,55 мкм с мощностью выходного сигнала более 10 дБм. Намечен выпуск экономичных передатчиков, основанных на использовании мощного лазера с постоянным излучением и внешним модулятором. При использовании длины волны 1,55 мкм возможно применение оптических усилителей. Модульное устройство HWX™ (рис. 9.6 а) позволяет подключить до восьми передающих модулей. С учетом возможности пассивного разветвления оптических сигналов, число удаленных оптических распределительных узлов, подключенных к одному шасси HWX, может быть еще больше.

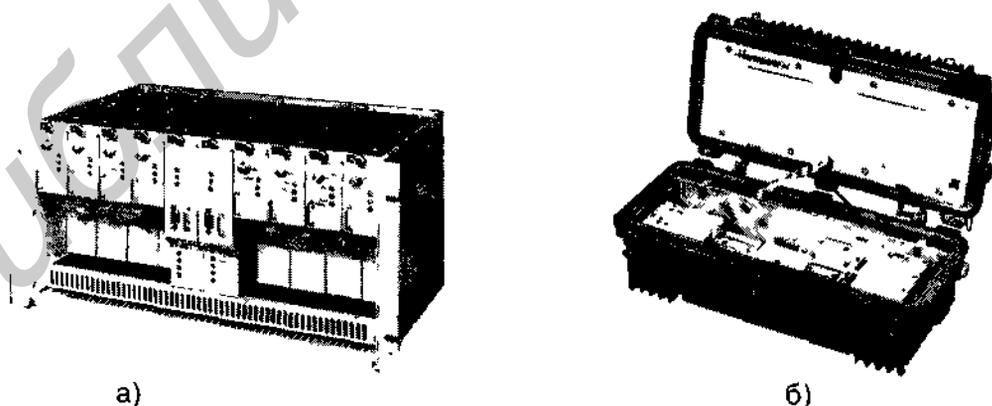


Рис. 9.6. Внешний вид: а) модульного шасси HWX с оптическими передатчиками, устанавливаемыми в головном узле, б) герметичной муфты ODN [7]

Оптические приемники. Устанавливаются на головной станции. Имеются приемники с шириной полосы 50-750 (862) МГц, которые используются для межстудийной передачи основной полосы и четырехканальные приемники оптического сигнала в диапазоне 5-42 МГц для приема обратных каналов.

Оптические трансиверы. Имеют модульную структуру и предназначены для приема-передачи в диапазонах интерактивного сервиса. Узел, обеспечивающий подключение к районной или городской АТС, а также доступ в Internet, может не совпадать с головным узлом студии кабельного телевидения. В этом случае необходимо использовать трансиверы. Трансиверы позволяют разделить оборудование для интерактивного сервиса (телефонии, приема передачи данных, интерактивного видео) и оборудование широковещательного аналогового телевизионного сервиса. "Телефонные" волокна должны проходить от центрального узла к каждому оптическому узлу. Телефонная часть сети НФС должна иметь полный горячий резерв, в то время как составляющая оборудования кабельного TV предъявляет меньшие требования по надежности. Кроме того, оптический сигнал, несущий телевизионные каналы, может расщепляться пассивными оптическими разветвителями в различных местах волоконно-оптической кабельной системы для снижения стоимости этой части проекта.

Головной цифровой терминал (HDT). Устанавливается в центральном узле и служит для сопряжения сети Nonewox с цифровым коммутатором. HDT поддерживает до 28 каналов T1 или до 24 каналов E1. При этом обеспечивается совместимость со стандартами сигнализации TR-008 или TR-303 (Северная Америка) или CAS или V.5 (Европа). HDT выполняет цифровые кросс-переключения полных каналов DS0 (64K) при использовании безблокировочного модуля обмена тайм-слотами (TST) и разграничивает локально-коммутируемые каналы от нелокально-коммутируемых или некоммутируемых. Он также может поддерживать услуги ISDN.

Оптический распределительный узел (ODN) является промежуточным распределительным узлом, в котором сопрягаются один или несколько BOK, идущие в головной офис или к другим ODN, а также коаксиальные ветви, идущие к абонентам. ODN обеспечивает доведение до абонентов телефонии, видео и/или других видов сервиса. ODN может конфигурироваться как концентратор обратных каналов, когда восходящие потоки от четырех коаксиальных сегментов будут мультиплексироваться и передаваться в один оптический обратный сигнал. Питание узла локальное или дистанционное по коаксиальной кабельной системе. ODN выполняется в виде герметичного модуля, внутри которого сосредоточено электронное оборудование для приема/передачи сигналов, идущих по BOK и коаксиальным кабелям (рис. 9.6 б). Отметим, что в случае локального источника питания, ODN сам может запитываться по коаксиальным ветвям удаленное оборудование на абонентской стороне, в частности, различные контрольные датчики, которые будут продолжать работать даже при отключении питания у абонента. Такая возможность полностью исключена в концепции FTTH.

Телевизионное абонентское устройство STU (set top unit) устанавливается у абонента и выполняет декодирование цифровых потоков видеоданных (MPEG-2/3) в реальном времени.

Устройство STU осуществляет декомпрессию в соответствии с инструкциями, содержащимися как часть цифрового потока. Кодер-модулятор может поддерживать разные скорости и типы потоков данных, как видео так и не видео. Это позволяет обеспечить не только видеотрансляции для абонента, но и передачу определенных файлов данных. Инструкции о доступе формируются в кадре и передаются на все каналы, однако только тот STU адрес, который указан в инструкции, может декодировать данные, содержащиеся в приходящих пакетах.

Необходимая битовая скорость передачи любой определенной части сжатого материала зависит от способа, которым это сжатие производилось (табл. 9.1). Стандарт компрессии MPEG-2 позволяет вести передачу со скоростью от 1,5 Мбит/с (низкий уровень компьютерного видео) до 60 Мбит/с (HDTV) при скорости не более 15 Мбит/с, приемлемой для NTSC, PAL и SECAM. Требуемая битовая скорость определяется в момент запроса абонента при выборе конкретного типа видео-приложения.

Устройство доступа для мобильных услуг. В зависимости от требований заказчиков и топологии сети возможен любой из ниже перечисленных вариантов использования НФС для мобильных услуг.

- Драйвер для удаленной антенны мобильной сети (RAD); подключается непосредственно к коаксиальному кабелю.
- Микросота с оптоволоконным подключением. Устанавливается рядом с оптическим узлом.
- Микробазовая станция сотовой связи. Использует каналы E1 (T1), предоставляемые сетью НФС.

Кабельные модемы для передачи данных. Отдельные устройства или модули в ISU (см. ниже). Обеспечивая передачу данных со скоростью от 64К (RS232) до 512К (вплоть до возможности предоставления интерфейса Ethernet 10Base-T), кабельные модемы хорошо подходят для организации доступа к сети Internet.

Однопользовательское устройство интеграции услуг (Home ISU). Предназначено для выделения телефонных каналов, каналов данных и подключения телевизора. Устанавливается в резиденции пользователя с доступом для обслуживания и является точкой разделения пользовательской сети и сети HFC. Базовая модель обеспечивает одну или две телефонные линии с возможностью удаленного включения, выключения доступа и видеосервис. Это устройство позволяет оператору связи следить за предоставлением пользователю услуг телефонии и CATV без выезда на место (дистанционный мониторинг и управление с головного узла). Имеется дополнительный слот, в который может быть установлен или модем Ethernet, или модуль ISDN, или дополнительно до двух телефонных линий.

Многопользовательское устройство интеграции услуг (MISU). Используется для подключения абонентов при их высокой территориальной концентрации (в многоэтажных домах, на предприятиях и т. п.) и предоставляет через HFC следующие виды услуг: телефонию, подключение местных телефонов-автоматов, Ethernet /Internet (до 512 кбит/с), E1 транспорт, ISDN BRI, каналы E&M, аварийную сигнализацию.

MISU имеет различные варианты исполнения от 12 до 96 телефонных линий и модульную структуру, причем все порты между HISU и различными MISU – взаимозаменяемые. MISU может устанавливаться в колодец, на подвесной кабель, в стойку, в распределительный шкаф и т. д. Питание локальное или дистанционное по коаксиальной сети.

Система контроля и управления сосредоточена в головном узле и обеспечивает полный контроль и управление всеми элементами сети HomeWork. Имеющаяся в настоящее время система управления обеспечивает интерфейс управления к одиночному элементу или ко всем компонентам уровня управления элементами сети (сервер EML). Дистанционная диагностика и контроль, предотвращение ошибок, локализация повреждений необходимы для нормального функционирования телекоммуникационной магистрали. Одним из элементов системы управления является узел сетевого мониторинга и управления (NMCS), который собирает и обрабатывает сигналы аварии и сигналы статус-индикаторов из центрального офиса, оптического распределительного узла коаксиальных усилителей и ISU. В частности, сервер EML может быть установлен отдельно для системы управления телефонией и для учета времени телефонных переговоров.

Структура потоков и транспортные характеристики HomeWork

Восходящие потоки (от абонента к центральному офису) передаются в полосе 5-42 МГц. Под нисходящие потоки (от центрального офиса к абоненту) отведена полоса частот 50-750 (862) МГц. Полоса 750-1ГГц зарезервирована под будущий двунаправленный широкополосный сервис (видеотелефония и др.).

Для передачи телефонных каналов применяется технология OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), позволяющая получить эффективную плотность передачи 4,2 бита символа на один герц. Передача каналов осуществляется в окне 6 МГц, в котором располагается 480 поднесущих (тонов). Система коррекции сигнала обеспечивает малый коэффициент ошибок ($BER=10^{-9}$) при скорости передачи 2 Мбит/с. В полосе 6 МГц размещается 240 каналов DS0 (64 кбит/с). Для восходящих телефонных каналов отводится полоса шириной 18 МГц (12-30 МГц), поэтому максимальное число восходящих телефонных каналов в одном коаксиальном сегменте равно 720 (3x240).

Полоса частот 5-12 МГц является служебной и предназначена для осуществления мониторинга сети, передачи информации статус-контроля и управления удаленными элементами сети.

Полоса 54-550 МГц отводится под нисходящие аналоговые телевизионные каналы. В этой полосе размещается 60 каналов системы PAL, SECAM или 110 каналов NTSC. Полоса частот 625-750 МГц отводится под нисходящие телефонные потоки, при этом канальная емкость нисходящего потока в четыре раза больше, чем восходящего (2880 каналов DS0 64 кбит/с). При доминировании видеосервиса полоса частот 550-750 МГц может использоваться для передачи 400 цифровых видеоканалов, сжатых по алгоритму MPEG-2, MPEG-3 до 3 Мбит/с, с использованием алгоритмов модуляции VSB-16 или QAM-256.

Почему используется технология OFDM? Помехи при передаче цифровых сигналов бывают двух видов. Узкозональные помехи (как подразумевает название) проявляются в окрестностях определенной частоты, и оказывают длительное влияние. Импульсные (широкозональные) помехи, напротив, имеют широкую спектральную зону, но небольшое время действия. Основной причиной узкозональных помех служат широкозональные сигналы, например сигнал любительского радио. Такая помеха может также появляться непреднамеренно от электромагнитных излучений со стороны работающих электронных устройств. Хотя теоретически HFC защищена от такого рода сигналов, любой полезный сигнал, распространяясь в коаксиальном кабеле, может испытывать интерференцию с этим шумовым фоном. Импульсный шум, приводящий к широкозональным помехам, может появляться от эпизодически появляющихся наводок, например, вследствие электромагнитного сигнала, возникающего в момент зажигания при запуске двигателя или при включении определенных электрических приборов.

Восходящий поток в сети HFC сильнее подвержен влиянию шумов по сравнению с нисходящим. При этом главным источником шума являются узкозональные помехи.

Способность сигнала противостоять влиянию шумов во многом зависит от используемой модуляционной техники. Как отмечалось ранее, для восходящего потока обычно используется техника временного мультиплексирования TDM с модуляциями QPSK или QAM-16 высокой степени избыточности. Так, большое число сигналов емкостью DS0 помещается на один радиочастотный (RF) носитель. Узкозональная помеха, появившаяся в любой части носителя, может привести к повреждению всех сигналов на носителе. Это создает серьезные проблемы при использовании мультиплексирования TDM, поскольку узкозональные помехи большой амплитуды могут создаваться довольно часто.

Один из основных способов борьбы против узкозональной помехи – смещение частоты носителя и соответственно всего RF блока сигнала в другую спектральную область, где помеха не сказывается. К сожалению, это требует резервирования в точности такой же области, как и размер RF блока. Резервирование таких больших областей может серьезно уменьшить и без того уже ограниченную полную емкость восходящего канала.

Системы частотного мультиплексирования FDM (в частности, OFDM) используют другой подход. Каждый из каналов DS0 помещается на свой индивидуальный RF носитель, рис. 9.7. Индивидуальные RF несущие продолжают подвергаться влиянию узкозональных помех, но реально одна такая помеха, которая ранее блокировала десятки каналов DS0 (когда был один носитель при TDM/QPSK), теперь может влиять только на один DS0 канал, не затрагивая остальные каналы. Таким образом, необходимо дополнительно зарезервировать только небольшой спектральный сегмент, в который при возникновении помех будут смещаться те каналы DS0, на несущей частоте которых возникает помеха. В результате значительно увеличивается эффективность использования предоставленной полосы в восходящем потоке.

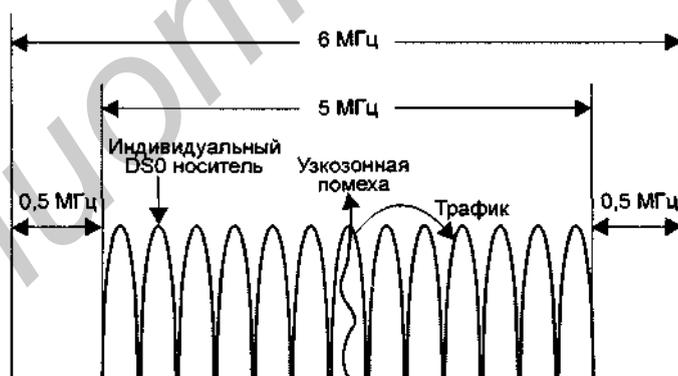


Рис. 9.7. Рост эффективности канала при использовании TDM (OFDM) с множеством несущих

Система спектрального смещения

Обычно в ODN осуществляется частотное мультиплексирование восходящих потоков от четырех коаксиальных ветвей и дальнейшее преобразование в выходной оптический сигнал, модулируемый в области спектра 5-42 МГц. Это накладывает ограничение на предоставляемые абонентам спектральные окна в восходящем потоке; абоненты, независимо от того, под-

ключены они к одной коаксиальной ветви или к разным, не могут использовать одну и ту же несущую частоту.

В силу дуплексной связи по ВОК, восходящий поток от ODN к головному цифровому терминалу может использовать ту же область спектра, что и нисходящий поток (подобное не допустимо по отношению к коаксиальному кабелю). Этот факт позволяет в четыре раза увеличить полную пропускную способность восходящего потока в расчете на один ODN посредством спектрального смещения принимаемых потоков от трех из четырех ветвей (рис. 9.8). Радиочастотные сигналы, принимаемые ODN в диапазоне от 5 до 42 МГц от ветвей 2, 3 и 4, перед частотным мультиплексированием испытывают смещение в более высокую область спектра, в результате чего происходит спектральное уплотнение в диапазоне от 5 до 200 МГц. Поскольку головной цифровой терминал рассчитан на работу с восходящими потоками от 5 до 42 МГц, выполняется обратное спектральное смещение и распараллеливание потоков в центральном офисе. Использование системы спектрального смещения позволяет предоставлять на каждую коаксиальную ветвь весь спектральный план от 5 до 42 МГц.

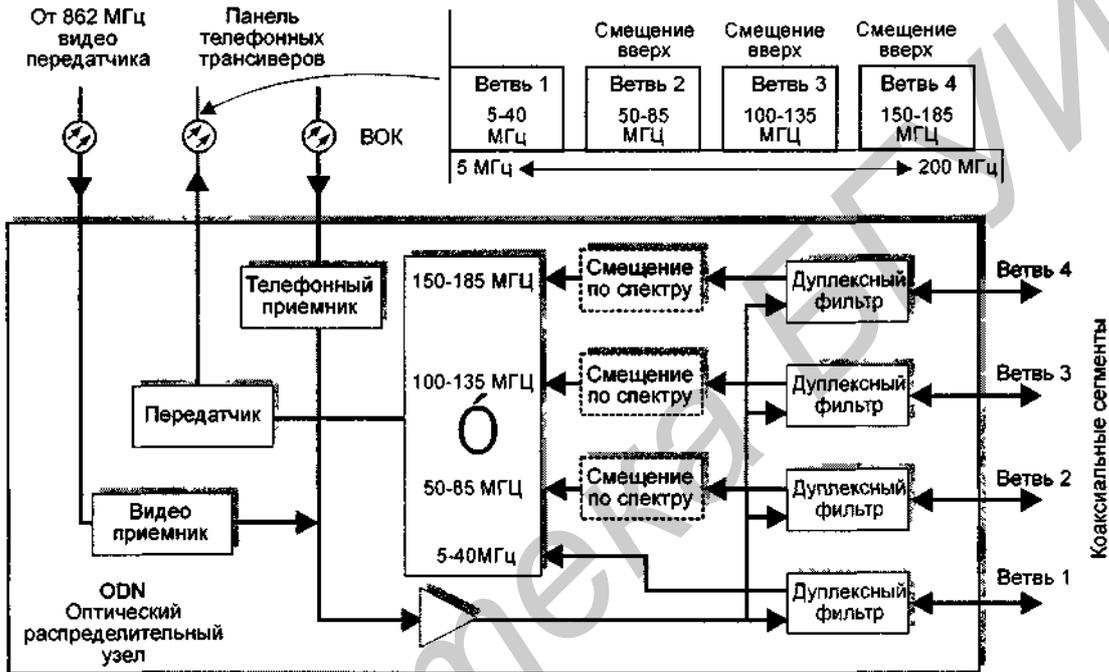


Рис. 9.8. Блок-схема ODN, поддерживающего спектральное смещение для восходящих потоков

Сценарии развертывания платформы Homebox

Модульная архитектура платформы дает возможность строить сети различного уровня сложности. Построение сети можно начинать с небольшого количества абонентов и использовать только один вид сервиса (например, только телевидение). Платформа позволяет плавно наращивать количество абонентов и поэтапно вводить новые виды сервиса, по мере роста числа абонентов и их потребностей.

Строительство сети, в зависимости от приоритета в развитии того или иного сервиса, может развертываться по трем основным сценариям: обеспечение видеосервиса; обеспечение телефонии; обеспечение видеосервиса и телефонии одновременно.

Только видеосервис. Установка платформы Homebox состоит из следующих этапов:

- прокладка одномодового волоконно-оптического кабеля и строительство распределительной коаксиальной кабельной сети (можно использовать существующие коммуникации, например, распределительную коаксиальную сеть местной студии кабельного телевидения);

- установка оборудования платформы **Homebox** в головном узле: головного контроллера и оптических передатчиков (один передатчик может обслуживать несколько ODN при использовании ответвителей);
- установка оборудования на оптических распределительных узлах (оптических приемного телефонного и восходящего передающего модулей);
- установка оборудования на абонентской стороне (требуется установление абонентского телевизионного устройства **STU**, если планируется прием платных, кодированных телевизионных каналов);
- подключение к центрам кабельного и общественного телевидения;
- ввод системы в эксплуатацию.

При монтаже волоконно-оптической линии связи необходимо принимать во внимание фактор надежности. Целесообразно прокладывать ВОК с большим числом волокон (от 16 и выше). На всех узлах предусмотрена многоуровневая система повышения надежности: это – дублирование источников питания, дублирование приемопередающего оборудования, дублирование оптических и коаксиальных линий связи, различные системы контроля функционирования оборудования с множеством температурных и других датчиков.

Допускается использование абонентами обратного восходящего канала в интерактивном режиме для уведомления операторов **CATV** о своих намерениях по просмотру передач.

Только телефония. Когда требуется в первую очередь организовать телефонную инфраструктуру района, платформа **Homebox** также предоставляет гибкое и экономное решение. В этом случае требуется следующее основное оборудование. В главный офис устанавливается головной цифровой терминал **HDT** и оптические трансиверы, в квартиру абонента – абонентское интегральное устройство **ISU**, а в **ODN** тоже самое оборудование, что и в предыдущем случае. **HDT** обеспечивает подключение к городской телефонной сети, информационным сетям общего пользования (**Internet**).

Видеосервис и телефония. Комбинированная телефонно-телевизионная платформа **Homebox** может быть реализована как результат наращивания одного из двух выше обсужденных вариантов. Особенностью построения смешанной платформы является то, что объединение узкозональной телефонной и широкозональной телевизионной служб происходит безболезненно. Дистанционные системы не заменяются во время наращивания. Все это создает гибкость в конфигурировании как с технической, так и с экономической точек зрения.

Общая схема развернутой сети **Homebox** показана на рис. 9.9.

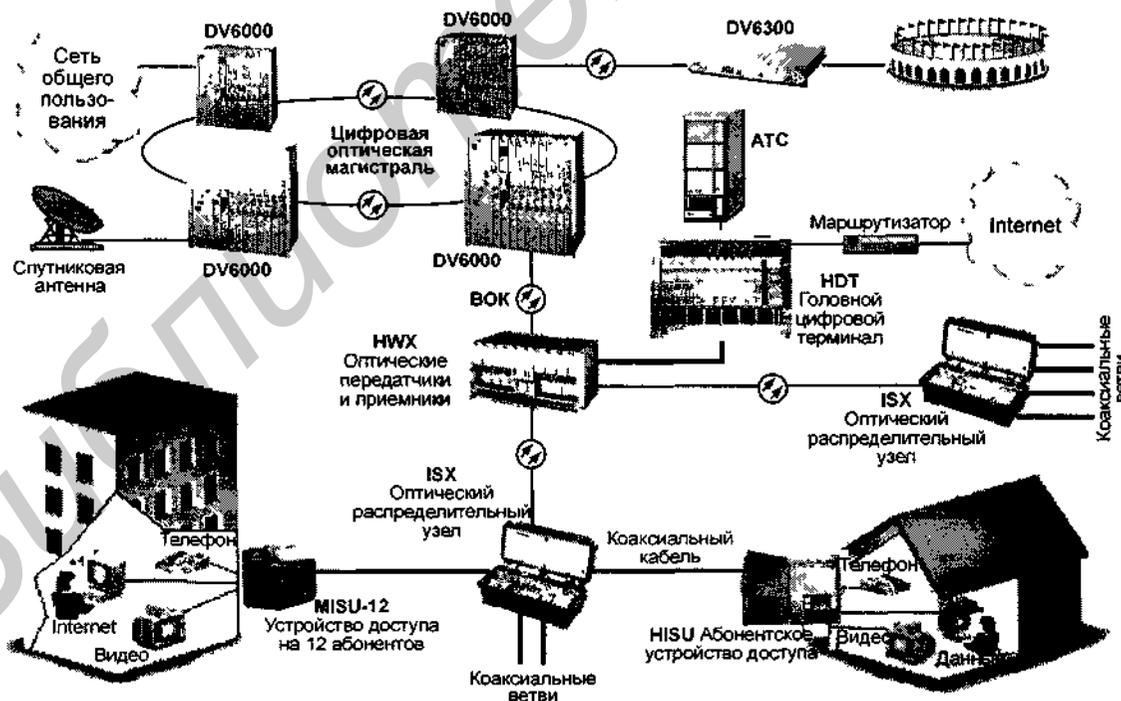


Рис. 9.9. Общая схема развернутой сети на базе оборудования DV6000

9.4. Межстудийный телевизионный обмен и система DV6000

Система DV6000 производства компании ADC Telecommunications предназначена для организации передачи оцифрованных телевизионных каналов между телестудиями, а также операторами кабельного телевидения в процессе распределения видеосигналов высокого качества по головным станциям. Сети на основе DV6000 могут охватывать сотни километров с возможностью выделения, добавления и пропуска каналов (функция DAP, drop/add/pass) на промежуточных узлах. Максимальное расстояние безретрансляционного участка составляет 120 км. Кроме композитных видеосигналов, система позволяет передавать цифровые видеоканалы (стандарт D1, 270 Мбит/с), MPEG, цифровые потоки телефонии (E1, E3), а также данных (удаленный мост Ethernet). Внешний вид шасси показан на рис. 9.10. Основные технические характеристики системы DV6000 приведены в табл. 9.6.

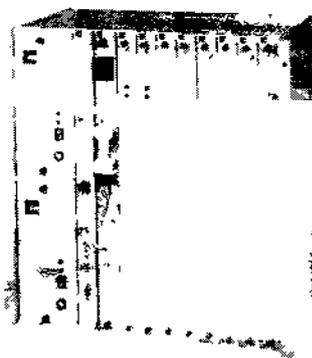


Рис. 9.10. Внешний вид оборудования DV6000

Система DV6000 точно оцифровывает каждый сигнал, используя несжатый формат. Разрешающая способность кодирования (10 или 8 бит) по каждому видеоканалу может выбираться независимо. DV6000 полностью модульная система, поддерживающая разнообразные сетевые конфигурации и различные видеоформаты.

Источник питания, оптический передатчик, оптический приемник могут быть продублированы для обеспечения резервирования, гарантирующего непрерывность передачи при отказе модуля или повреждении линии. Предусмотрен дистанционный контроль состояния системы. Система DV6000 входит в семейство продуктов DV. В это семейство также входят еще две системы: двунаправленная система DV6010 и одноканальная система DV6300. При передаче используется техника временного мультиплексирования TDM, причем до 16 телевизионных каналов может одновременно передаваться по одному волокну на одной длине волны с суммарной скоростью передачи около 2,4 Гбит/с. Оборудование позволяет осуществить дополнительно волновое мультиплексирование WDM, в результате которого по одному волокну передаются сразу четыре длины волны в окне 1550 нм, т.е. достигается пропускная способность до 64 телевизионных каналов.

Система DV6000 получила широкое распространение в США, Германии, Англии. В России ее используют Российское телевидение, ТСН, Метроком, Комкор, Лукойл.

Схема простейшего подключения системы DV6000 показана на рис. 9.11 а. Передающее устройство (MUX) генерирует сигнал clock, по которому синхронизируется приемное устройство (DEMUX), так что прием осуществляется в синхронном режиме. Допускается подключение нескольких последовательных устройств (рис. 9.11 б). При этом все промежуточные устройства (DAP) могут выполнять функцию ввода/вывода каналов. На рис. 9.11 в) показана схема подключения четырех устройств (одного MUX и трех DAP), при которой создается резервирование на случай повреждения одного из участков сети. В этой схеме дополнительно используются три оптических переключателя типа 2x1, работающих согласованно с устройствами DAP, и два пассивных оптических разветвителя. В нормальном режиме работы все переключатели установлены в нижнее состояние, в соответствии с рис. 9.11. в). Если DAP не получает сигнал нужного качества, он устанавливает прикрепленный переключатель в альтернативное состояние.

Таблица 9.6. Основные технические характеристики системы DV6000 [8]

Оптические параметры			
Скорость передачи системы	2.38 Гбит/с		
Оптические длины волн, нм	1310, 1550, 1546.1, 1549.3, 1552.5, 1555.7		
Оптические разъемы	Супер FC/PC или стандартные SC/PC		
Тип передатчика	DFB лазер		
Мощность передатчика	0-3 дБм		
Тип приемника	InGaP лавинный фотодиод		
Бюджет оптической линии связи	30 дБ для BER < 10 ⁻⁹		
Максимальный уровень оптического приема	-8 дБм		
Параметры аналогового видеоканала			
Форматы входных сигналов	NTSC, PAL, SECAM, скремблированный НЧ видеосигнал		
Размах полного видеосигнала на выходе линии, В	1±0.1		
Импеданс	75 Ом, баланс		
Частота опроса	13,524 МГц		
Разрешающая способность кодирования	8 бит	10 бит	
Сигнал/шум при медленном изменении сигнала (шум квантования)	Не хуже 59 дБ	Не хуже 67 дБ	
Частотная характеристика (мультичастотного сигнала)	4,2 МГц	±0,10 дБ	±0,10 дБ
	6,1 МГц	+0,3/-1,0 дБ	+0,3/-1,0 дБ
	6,2 МГц	+0,3/-3,0 дБ	+0,3/-3,0 дБ
Различие усиления сигналов яркости и цветности, %	2,5	1,5	
Расхождение во времени сигналов яркости и цветности, нс	15	15	
Интермодуляционные искажения, %	±2	±1	
Нелинейность сигнала яркости, %	±3	±1,5	
Дифференциальное усиление, %	±3,5	±1,5	
Дифференциальная фаза, град	±2,0	±1,0	
Нелинейность сигнала цветности, %	±4	±2	
Фазовые искажения сигнала цветности, град	±2	±1	
Параметры звукового канала			
Амплитуда входного сигнала	5-18 дБм		
Импеданс	600 Ом, баланс.		
Частота опроса	41,88 кГц		
Разрешающая способность кодирования	16 бит		
Коэффициент нелинейных искажений на частоте 1 кГц, %	Не более 0,05		
Неравномерность АЧХ, дБ в диапазоне частот, Гц	30-125	-0,6/+0,17	
	125-10000	±0,17	
	10000-15000	-0,6/+0,17	
Отношение максимального значения сигнала к психометрическому значению шума, дБ	не менее 70		

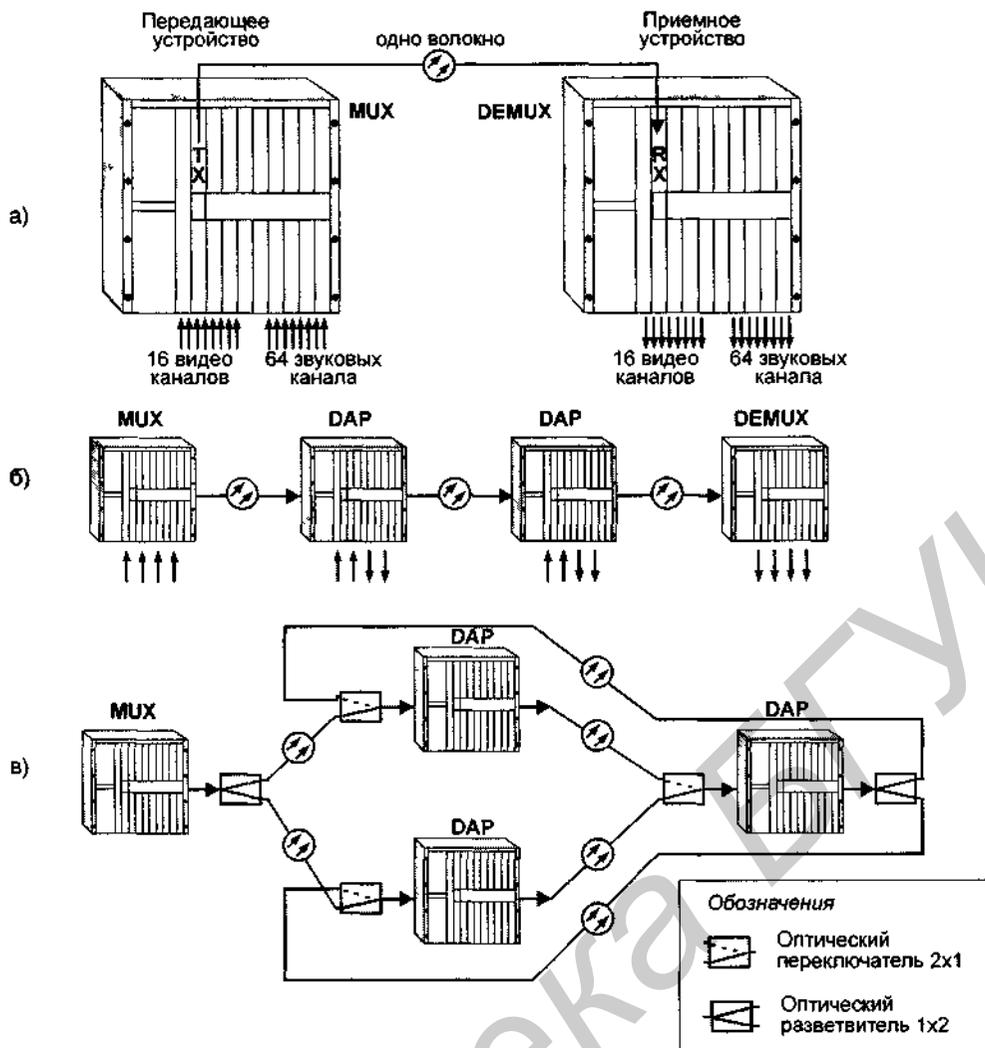


Рис. 9.11. Схемы подключения оборудования DV6000:
 а) простейшая схема подключения двух устройств;
 б) подключение нескольких последовательных устройств;
 в) схема подключения четырех устройств с резервированием по волоконно-оптической кабельной системе

Литература к главе 9

1. P.W. Shumate. Ch.2 Telecommunications, Cable Television, and Data Link Systems: (Broadband Access), in Optoelectronics in Japan and the United States. 1997, http://itri.loyola.edu/opto/c2_s4.htm
2. The Cable Connection: The Role of Cable Television in the National Information infrastructure. CableLabs, 1995, <http://www.cablelabs.com/WPapers/cableNII.html>
3. IEEE Project 802.14/a Draft 3 Revision 1: Cable-TV access method and physical layer specification. Edited by Ivan Reede, Matt Brandt, and Jeyhan Karaoguz. IEEE 1998. – 216 pp.
4. Hybrid Fiber/Coax (HFC) Telephony. ADC Telecommunications, 1998, <http://www.webproforum.com/adc/tp01.html>
5. Components of the HFC Network. Scientific Atlanta, 1998, <http://www.webproforum.com/sci-atlanta/tp01.html>

Список сокращений

Английские сокращения

ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line	Асимметричная цифровая абонентская линия
AM	Amplitude Modulation	Амплитудная модуляция
ANSI	American Nation Standards Institute	Американский национальный институт стандартов
AON	All-Optical Networks	Полностью оптические сети
APC	Angled Physical Contact	Угловой физический контакт (тип контакта в оптических соединителях)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Американский стандартный код для обмена информацией
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Спонтанно усиленное излучение
ASK	Amplitude Shift Keying	Амплитудная манипуляция (вид модуляции)
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Режим асинхронной передачи (универсальный сетевой стандарт высокой пропускной способности)
AUI	Attachment Unit Interface	Интерфейс устройства доступа (подключения)
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Решеточная структура волноводных массивов
BER	Bit-Error Rate	Частота появления ошибок
BNC	Bayonet Nut Connector	Байонетный соединитель (типа "бэби N")
BPPS	Bit-Parallel Packet Switching	Параллельная битовая коммутация
BRI	Basic Rate Interface	Интерфейс базового доступа (со скоростью 144 Кбит/с к сети ISDN)
BSPS	Bit-Sequential Packet Switching	Последовательная битовая коммутация
BT	Bit Time	Битовый интервал (время, за которое передается один бит)
CATV	Community Antenna Television or Cable Television	Кабельное телевидение
CCITT	International Telegraph and Telephone Consultative Committee	Международный консультационный комитет по телефонной и телеграфной связи (современное название ITU-T)
CDDI	Copper Distributed Data Interface	Распределенный интерфейс передачи данных (трафика FDDI) по медному кабелю
CF	Fiber Cutoff (Wavelength)	Волоконная длина волны отсечки (в одномодовом волокне)
CO	Central Office	Центральный офис
CP	Collision Presence	Наличие коллизии
CRC	Cyclic Redundancy Check	Контрольная циклическая сумма
CSMA/CD	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection	Множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий (конфликтов)
CCF	Cabled Fiber Cutoff (Wavelength)	Кабельная длина волны отсечки (в одномодовом волокне)
DA	Destination Address	Адрес назначения
DAC	Dual Attachment Concentrator	Концентратор с двойным подключением к магистральной сети FDDI
DAS	Dual Attachment Station	Станция с двойным подключением к магистральной сети FDDI
DBS	Direct Broadcast Satellite (service)	Прямой спутниковый широкоэвещательный сервис

DCF	Dispersion-Compensating Fiber	Волокно с компенсирующей дисперсией
DEMUX	DeMultiplexor	Демультимплексор
DFB	Distributed FeedBack (Laser)	Лазер с распределенной обратной связью
DMD	Differential Mode Delay	Дифференциальная модовая задержка
DQDB	Distributed Queue Dual Bus	Двойная шина распределенных очередей. Стандарт IEEE 802.6 локальной сети городского масштаба
DSF	Dispersion-Shifted (single mode) Fiber	Волокно (одномодовое) со смещенной дисперсией
DSL	Digital Subscriber Line	Цифровая абонентская линия
DTE	Data Terminal Equipment	Оконечное оборудование данных
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Плотное волновое мультиплексирование, разновидность WDM, когда расстояние между соседними длинами волн не более 2 нм
E1	E1	Первичный канал 2,048 Мбит/с, соответствующий второму уровню в европейской версии PDH
E2	E2	Вторичный канал 8,448 Мбит/с, соответствующий второму уровню в европейской версии PDH
E3	E3	Третичный канал 34,368 Мбит/с, соответствующий третьему уровню в европейской версии PDH
EC laser	External Cavity laser	Лазер с внешним резонатором
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Оптический усилитель на волокне, легированном эрбием
EIA	Electronic Industries Association	Ассоциация производителей электронного оборудования в США
FCS	Frame Check Sequence	Контрольная последовательность кадров
FDDI	Fiber Distributed Data Interface	Распределенный интерфейс передачи данных по волоконно-оптическому кабелю. Стандарт сети, принятый комитетом ANSI X3T9.5
FDF	Fiber Distribution Frame	Оптический распределительный шкаф
FDM	Frequency Division Multiplexing	Мультиплексирование с помощью деления частоты
FEXT	Far-End CrossTalk (синоним isolation)	Переходные помехи на дальнем конце
FITL	Fiber In The Loop	Волокно, положенное по кругу
FM	Frequency Modulation	Частотная модуляция
FMDF	Fiber Main Distribution Frame	Главный оптический распределительный шкаф
FOIRL	Fiber Optic Inter-Repeater Link	Волоконно-оптический канал между повторителями Ethernet
FP laser	Fabry-Perot laser	Лазер с резонатором Фабри-Перо
FSK	Frequency Shift Keying	Частотная манипуляция (вид модуляции)
FTB	Fiber Terminal Block	Блок терминирования волокон
FTP	File Transfer Protocol	Протокол передачи файлов
FTTC	Fiber To The Curb	Волокно в монтажный шкаф
FTTH	Fiber To The Home	Волокно в дом (волокно в квартиру)
FWM	Four-Wave Mixing	Четырехволновое смешивание
GEA	Gigabit Ethernet Alliance	Гигабитный Ethernet альянс
GMII	Gigabit Media Independent Interface	Гигабитный средонезависимый интерфейс

HDLC	High-Level Data Link Control	Управление каналом данных высокого уровня
HDT	Host Digital Terminal	Головной цифровой терминал
HFC	Hybrid Fiber Coax (architecture)	Гибридная волоконно-коаксиальная (архитектура)
ICS	Interim Cut-through Switching	Промежуточная коммутация на лету
IEC	International Electrotechnical Commission	Международная электротехническая комиссия
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	Институт инженеров электротехники и электроники
IFG	Inter-Frame Gap	Межкадровый интервал
ILD	Injection Laser Diode	Лазерный диод
IP	Internet Protocol	Межсетевой протокол
IPX	Internetwork Packet Exchange	Межсетевой обмен пакетами (протокол для сетевой операционной системы Novell NetWare)
ISDN	Integrated Services Digital Network	Цифровая сеть с интегрированным обслуживанием
ISO	International Standards Organisation	Международная организация по стандартизации
ISU	Integrated Service Unit	Интегрированное сервисное устройство
ITU	International Telecommunication Union	Международный союз по электросвязи (структурное подразделение ООН)
ITU-T	тоже самое, что ITU-TSS	
ITU-TSS	International Telecommunication Union/ Telecommunication Standardization Sector	Сектор по стандартизации телекоммуникаций в составе ITU
LD	Laser Diode	Лазерный диод
LED	Light-Emitting Diode	Светоизлучающий диод
LLC	Logical Link Control	Управление логическим звеном (верхний подуровень канального уровня модели OSI)
LSA	LAN Security Architecture	Архитектура безопасности локальной сети
MAC	Media Access Control	Управление доступом к среде (нижний подуровень канального уровня модели OSI)
MAU	Media Attachment Unit	Блок доступа к среде передачи данных
MCP	Mode conditioning Patch-cord	Специализированный оптический шнур, обеспечивающий лучший режим распространения мод при наличии DMD
MDI	Medium Dependent Interface	Интерфейс, зависящий от среды
MFD	Mode Field Diameter	Диаметр модового поля
MIC	Media Interface Connector	Тип оптического соединителя, принятый в стандарте FDDI
MII	Medium Independent Interface	Средонезависимый интерфейс
MMF	Multi Mode Fiber	Многомодовое волокно
MMF-PMD	Multi Mode Fiber – Physical Medium Dependent interface	Зависящий от физической среды интерфейс на многомодовое волокно
MUX	Multiplexor	Мультиплексор
NA	Numerical Aperture	Числовая апертура
NAC	Null Attachment Concentrator	Концентратор FDDI, не имеющий подключений к магистральной сети
NEXT	Near-End CrossTalk (синоним directivity)	Переходные помехи на ближнем конце

NF	Noise Figure	Шум-фактор
NIC	Network Interface Card	Сетевая карта
NMCS	Numerical Integrated Service Unit	Интегрированное сервисное устройство множественного доступа
NRZ	Non Return to Zero	Кодирование без возврата к нулю
NRZI	Non Return to Zero Invert on ones	Кодирование без возврата к нулю с инвертированием на единицах
NZDSF	Non-Zero Dispersion-Shifted (single mode) Fiber	Волокно (одномодовое) с ненулевой смещенной дисперсией
OBS	Optical Bypass Switch	Оптический обходной переключатель
ODN	Optical Distribution Node	Оптический распределительный узел
OSI	Open Systems Interconnection (model)	Модель взаимодействия открытых систем
OT	Optical Terminal	Оптический терминал
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Амплитудно-импульсная модуляция
PAS	Profile Alignment System	Метод автоматического центрирования, основанный на боковом просвечивании волокон
PC	Physical Contact	Физический контакт (тип контакта в оптических соединителях)
PCS	Physical Coding Sublayer	Уровень физического кодирования
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	Плещиохронная цифровая иерархия
PHY	Physical Layer Protocol	Протокол физического уровня (стандарт верхнего подуровня физического уровня FDDI)
PLS	Physical Layer Signaling	Подуровень физической сигнализации
PMA	Physical Medium Attachment	Уровень подсоединения к физической среде
PMD	Physical Medium Dependent	Зависящий от физической среды протокол (стандарт нижнего подуровня физического уровня FDDI)
PON	Passive Optical Network	Пассивная оптическая сеть
PRI	Primary Rate Interface	Интерфейс основного доступа (со скоростью 1,544 и 2,048 Мбит/с к сети ISDN для США и Европы соответственно)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Квадратурная амплитудная модуляция
QoS	Quality of Service	Качество сервиса
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Квадратурная фазовая модуляция
RSVP	Resource Reservation Protocol	Протокол резервирования ресурсов
RTD	Round-Trip Delay	Задержка на двойном пробеге
SA	Source Address	Адрес отправителя
SAS	Single Attachment Station	Станция с одинарным подключением к магистральной сети FDDI (через концентратор)
SAC	Single Attachment Concentrator	Концентратор с одинарным подключением к магистральной сети FDDI (через концентратор)
SCM	Sub-Carrier Multiplexing	Мультиплексирование на поднесущей
SDDI	Shielded Distributed Data Interface	Промышленный стандарт для реализации FDDI по экранированной витой паре (STP IBM Type 1)
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Синхронная цифровая иерархия. (Европейский стандарт для волоконно-оптических линий распределенных сетей)
SDV	Switch Digital Video	Коммутируемое цифровое видео
SF	Standard Fiber	Стандартное волокно (одномодовое ступенчатое волокно)
SFD	Start Frame Delimiter	Ограничитель начала кадра

SFM	Self-Phase Modulation	Межфазная модуляция
SMDS	Switched Multimegabit Data Service	Служба многомегабитовой коммутации данных
SMF	Single Mode Fiber	Одномодовое волокно
SMF-PMD	Single Mode Fiber – Physical Medium Dependent	Стандарт нижнего подуровня физического уровня FDDI, ориентированный на одномодовое оптическое волокно
SMT	Station Management	Управление станцией. Стандарт FDDI, ответственный за управление сетевым устройством (охватывает подуровни MAC, PHY, PMD)
SMWL	Simple Multi-Wavelength Link	Простая многоволновая линия связи
SNA	System Network Architecture	Системная сетевая архитектура
SNMP	Simple Network Management Protocol	Простой протокол управления сетью
SNR	Signal to Noise Ratio	Соотношение сигнал/шум
SONET	Synchronous Optical NETWORK	Синхронная оптическая сеть (стандарт синхронной цифровой иерархии, принятый в США)
SPC	Super Physical Contact	Суперфизический контакт (тип контакта в оптических соединителях)
SPM	Self-phase modulation	Межфазная модуляция
STM-1	Synchronous Transport Module of level 1	Синхронный транспортный модуль первого уровня иерархии SDH – 155,520 Мбит/с
STM-16	Synchronous Transport Module of level 16	Синхронный транспортный модуль 16 уровня иерархии SDH – 2488,320 Мбит/с
STM-4	Synchronous Transport Module of level 4	Синхронный транспортный модуль 4 уровня иерархии SDH – 622,080 Мбит/с
STM-64	Synchronous Transport Module of level 64	Синхронный транспортный модуль 64 уровня иерархии SDH – 9953,280 Мбит/с
STP	Shielded Twisted Pair	Экранированная витая пара
SVV	Segment Variability Value	Величина сегментной вариации задержки
T1	T1	Первичный цифровой канал со скоростью передачи 1,544 Мбит/с, стандартный в американской иерархии (PHD)
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	Протокол управления передачей/межсетевой протокол
TDM	Time Division Multiplexing	Временное мультиплексирование (уплотнение)/ Мультиплексирование с временным разделением
THT	Token Holding Time	Время удержания маркера (в стандарте FDDI)
TIA	Telecommunication Industry Association	Ассоциация промышленности средств связи
TMN	Telecommunications Management Network	Система управления телекоммуникационными сетями
TP-PMD	Twisted Pair – Physical Medium Dependent interface	Зависящий от физической среды интерфейс на витую пару
TTRP	Timed Token Rotation Protocol	Протокол временного обращения маркера
TTRT	Target Token Rotation Time	Ожидаемое время обхода кольца маркером
UPC	Ultra Physical Contact	Ультрафизический контакт (тип контакта в оптических соединителях)
UTP	Unshielded Twisted Pair	Неэкранированная витая пара
VCI	Virtual Circuit Identifier	Виртуальный идентификатор цепи
VSB	Vestigial Side-Band	Боковая полоса частот
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Мультиплексирование с уплотнением по длинам волн / волновое мультиплексирование
WWW	World Wide Web	Всемирная паутина (сеть Internet)

Русские сокращения

ВОК	Волоконно-оптический кабель
ВОЛС	Волоконно-оптическая линия связи
ИКП	Интерконнектное подключение
КДЗС	Комплект для защиты сварки
ККП	Кросс-коннектное подключение
ЛВС	Локальная вычислительная сеть
ЛФД	Лавинный фотодиод
ЛЭП	Линия электропередач
МС	Механический сплайс
ОКУ	Оптическое кроссовое устройство
ООД	Оконечное оборудование данных
ОРК	Оптическая распределительная коробка
ОРП	Оптическая распределительная панель
ОРУ	Оптическое распределительное устройство
ОРШ	Оптический распределительный шкаф
ОУ	Оптический усилитель
ПК	Персональный компьютер
ПОМ	Передающий оптоэлектронный модуль
ППЛУ	Полупроводниковый лазерный усилитель
ПРОМ	Приемный оптоэлектронный модуль

Различают волоконную длину волны отсечки (λ_{CF}) и кабельную длину волны отсечки (λ_{CCF}). Первая соответствует слабо напряженному волокну. На практике же волокно помещается в кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Кроме этого, сильные искривления волокон происходят при их укладке в сплайс-боксах. Все это ведет к подавлению побочных мод и смещению λ_{CCF} в сторону коротких длин волн по сравнению с λ_{CF} . С практической точки зрения кабельная длина волны отсечки представляет больший интерес.

Волоконную длину волны отсечки можно оценить как теоретически, так и экспериментально. Теоретически легко это сделать для ступенчатого одномодового волокна – на основании выражений (2-7), (2-8) и (2-9) получаем $\lambda_{CF} = \pi \cdot d \cdot NA / 2,405 = 1,847 \cdot d \cdot n_1 \sqrt{\Delta}$.

λ_{CCF} , в отличие от λ_{CF} , можно оценить только экспериментальным образом. Одним из практических методов измерения длин волн отсечки λ_{CF} и λ_{CCF} является метод передаваемой мощности (transmitted power method) [5, 6]. Сравнивается измеренная переданная спектральная мощность в зависимости от длины волны для образца одномодового волокна длиной 2 м с аналогичным параметром, полученным на образце многомодового волокна. Строится кривая

$$A_m(\lambda) = 10 \lg \frac{P_s(\lambda)}{P_m(\lambda)} \text{ дБ}, \quad (2-11)$$

где A_m – разница затуханий; P_s – мощность на выходе одномодового волокна; P_m – мощность на выходе многомодового волокна.

Многомодовое волокно является эталонным. При этом один и тот же источник излучения с перестраиваемой длиной волны используется как для одномодового, так и многомодового волокна. Строится кривая $A_m(\lambda)$, рис. 2.4, длинноволновый участок которой экстраполируется прямой (1). Строится параллельная прямая (2), отстоящая ниже от (1) на 0,1 дБ. Точка пересечения прямой (2) с кривой $A_m(\lambda)$ соответствует длине волны отсечки.

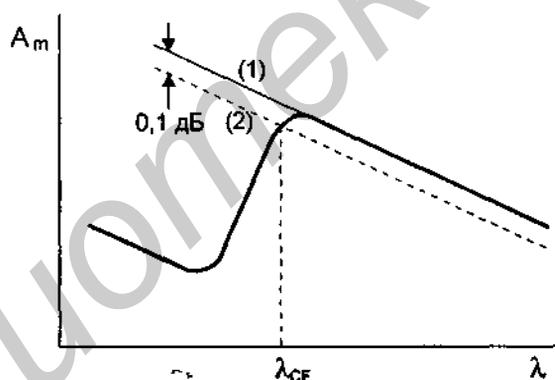


Рис. 2.4. Определение длины волны отсечки

Условия измерения должны соответствовать рекомендациям TIA/EIA и CCITT [1, 2, 3]. Концы волокна очищаются от защитного покрытия, скалываются – угол скола не должен превышать 2° . Диаметр светового пятна от источника излучения – 200 мкм; числовая апертура вводимого излучения 0,20; полная ширина спектра излучения ≤ 10 нм, измеренная на полу-максимуме; измеряемый диапазон длин волн от 1000 нм до 1600 нм с шагом 10 нм.

При измерении длины волны отсечки волокна λ_{CF} образец волокна должен иметь длину 2 м и располагаться таким образом, чтобы образовывалась одна петля радиусом 140 мм, рис. 2.5 а. Не должно быть дополнительных изгибов волокна с радиусом, меньшим 140 мм. Экспериментально измеренная длина волны отсечки волокна близка к теоретическому значению, которое можно получить из критерия (2-7), если обратить его в равенство.