

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра систем телекоммуникаций

Я.В. Алишев, В.Н. Урядов

***ФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ
И СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ***

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплине
«Волоконно-оптические системы передачи»
для студентов специальностей
«Многоканальные системы телекоммуникаций»
и «Радиосвязь, радиовещание и телевидение»

Минск 2003

УДК 621.395.4 (075.8)
ББК 32.86-5 я 7
А 50

Р е ц е н з е н т :
зав. кафедрой сетей и устройств телекоммуникаций,
д-р техн. наук, проф. В.К. Конопелько

Алишев Я.В.

А 50 Фотонные системы и сети телекоммуникаций: Учеб. пособие по дисциплине «Волоконно-оптические системы передачи» для студ. спец. «Многоканальные системы телекоммуникаций» и «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» / Я.В. Алишев, В.Н. Урядов. – Мн.: БГУИР, 2003. – 38 с.: ил.

ISBN 985-444-515-1.

В учебном пособии рассмотрены пути создания сверхвысокоскоростных полностью оптических систем и сетей телекоммуникаций с использованием новейших информационных технологий, а также наиболее перспективных их компонентов.

Пособие предназначено для студентов 4- и 5-х курсов специальностей «Многоканальные системы телекоммуникаций» и «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» всех форм обучения. Может быть полезно аспирантам и соискателям ученых степеней, а также специалистам, работающим в области оптических информационных систем и сетей.

УДК 621.395.4 (075.8)
ББК 32.86-5 я 7

ISBN 985-444-515-1

© Алишев Я.В., Урядов В.Н., 2003
© БГУИР, 2003

ВВЕДЕНИЕ

Еще совсем недавно казалось, что технологии SDH и ATM смогут решить проблемы резкого увеличения пропускной способности систем телекоммуникаций и возможности эффективного объединения различных видов трафика. Так, оптический линейный тракт синхронной цифровой иерархии STM-64 имеет скорость передачи ≈ 10 Гбит/с, что соответствует длине тактового интервала ≈ 10 пс, и практически является предельной скоростью для технологии в области полупроводниковой микроэлектроники и пределом возможности увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) способом временного разделения каналов (ВРК).

Идея, высказанная советским академиком А.А. Харкевичем, о квадратичной зависимости требуемого объема передаваемой по сетям связи информации от уровня промышленного производства [1] оказалась, мягко говоря, идеей о нижней границе пропускной способности, необходимой для передачи мультимедийного трафика (одновременной передачи речи, компьютерных данных, видеоизображений, обмена сетью Интернет). Стремительный рост числа пользователей сети Интернет и множества ее приложений стал причиной не только возникновения новых секторов экономики, но и взрывного роста трафика, изменения соотношения трафика речи и данных, изменения и технической цели развития сети, преобразования ее из цифровизации в пакетизацию. Стало ясно, что Интернет-протокол (IP) будет играть важную роль в архитектуре телекоммуникационных фотонных систем и сетей будущего, объединяя речь, компьютерные данные и видео для совместной передачи, что настоятельно потребует соответствующего увеличения пропускной способности систем до десятков и сотен гигабит и даже единиц терабит в секунду. При этом передача речи – не самая значительная составляющая пакета, хотя, как прогнозирует Международный союз электросвязи (МСЭ), возможно, уже в 2004 г. по протоколу IP будет передаваться до 40% всего Международного телефонного трафика [2].

На магистральных линиях телекоммуникаций целесообразно использовать спектральное разделение каналов (технологии Wavelength Division Multiplexing, WDM) [3], которое сегодня сняло вопрос об ограничениях на скорости передачи и объемы передаваемой информации. Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM) – сравнительно новая технология развития оптического разделения каналов.

В учебном пособии рассмотрены принципы построения фотонных систем и сетей телекоммуникаций, их основные компоненты, а также перспективы повышения пропускной способности и помехоустойчивости систем.

1. Методы мультиплексирования каналов в фотонных системах и сетях телекоммуникаций

Вводные замечания

Проектирование систем и сетей телекоммуникаций с экономической точки зрения в основном диктовалось необходимостью передачи речи. С крупномасштабным развертыванием сетей передачи данных происходит модификация самой архитектуры сетей. Именно поэтому требуются фундаментальные изменения в принципах проектирования, контроля и управления сетями.

Очевидно, что сложившаяся ситуация эффективно стимулировала и стимулирует исследования и разработки по совершенствованию систем телекоммуникаций, приводя к появлению новых, более совершенных технологий. Одной из таких технологий, рожденных в конце последнего столетия, явилась передача сигналов по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Преимущества ВОЛС перед системами на медном коаксиальном кабеле известны более 20 лет, и все эти годы указанные линии стоили на 20–40% дороже [4].

В настоящее время волоконно-оптическая связь занимает значительную долю рынка телекоммуникаций. При этом существует большой нереализованный потенциал в части повышения скорости передачи информации по оптическим волокнам и снижения стоимости услуг в расчете на бит передаваемой информации. На реализацию этого потенциала направлены последние разработки сверхвысокоскоростных волоконно-оптических линий связи и систем обмена информацией на их основе.

Уже сегодня созданы и эксплуатируются ВОЛС, обеспечивающие передачу и обработку информации со скоростями в сотни гигабит в секунду. Новые высокоскоростные оптические системы связи уже строятся и проектируются на терабитные скорости передачи с использованием пикосекундных лазеров и фотоприемных устройств, волоконно-оптических усилителей, технологий временного и спектрального мультиплексирования. По мнению специалистов, уже в ближайшие годы возможна практическая реализация ВОЛС на скорости передачи информации в десятки терабит в секунду. Это является наглядным примером ускорения научно-технического прогресса.

Наряду с магистральными системами связи важнейшими потребителями таких ВОЛС будут системы связи, обеспечивающие передачу данных во всемирной сети Интернет и телеконференций, трафик которых возрастает более чем на 200% в год.

Практическая реализация сверхвысокоскоростных ВОЛС и систем на их основе связана с решением целого ряда научных и инженерно-технических проблем.

Использование технологии ВРК позволило увеличить пропускную способность волоконно-оптических линий связи до 10 Гбит/с. Линии со скоростью 10 Гбит/с будут постепенно заменять первоначально использовавшиеся системы ВРК со скоростью 2,5 Гбит/с. Скорость передачи 10 Гбит/с в некотором роде разграничивает два типа систем ВРК. Выше этой скорости некоторые основные характеристики оптического волокна – поляризационная модовая дисперсия, хроматическая дисперсия – начинают значительно влиять на качество передачи и должны приниматься во внимание при разработке систем связи. Это является серьезным препятствием для ведущихся в настоящее время разработок систем ВРК со скоростями передачи 40 Гбит/с и выше. Кроме того, для дальнейшего увеличения скорости требуются новые методы модуляции лазерного излучения, что ведет к росту сложности и стоимости приемопередающего оборудования.

Одним из существенных факторов, ограничивающих скорость передачи сигнала, является хроматическая дисперсия. Хроматической дисперсией называют как зависимость эффективного показателя преломления от длины волны, так и ее следствие – увеличение ширины оптических импульсов при их распространении по волокну. Для узкополосного лазера (с шириной спектра не более 0,1 нм) при увеличении скорости передачи с 2,5 Гбит/с (STM-16) до 10 Гбит/с (STM-64) из-за влияния хроматической дисперсии максимально возможная протяженность линии связи уменьшается в 16 раз [5]. Применение методов, уменьшающих влияние хроматической дисперсии, ведет к увеличению потерь, стоимости и сложности системы. Для стандартного ступенчатого одномодового волокна (G. 652 по классификации МСЭ) максимальная дальность передачи со скоростью 10 Гбит/с без компенсации и коррекции дисперсии составляет 50–75 км.

Для уменьшения влияния хроматической дисперсии в качестве источников излучения применяют узкополосные лазеры с длиной волны излучения, близкой к длине волны нулевой дисперсии волокна. Работать непосредственно на длине волны нулевой дисперсии волокна не следует из-за возрастающего влияния эффекта четырехволнового смешения, которое мы рассмотрим далее, в разд. 2. К сожалению, частота излучения лазеров с внутренней модуляцией может определенным образом меняться во времени. Это негативное явление приводит к значительному расширению спектра генерируемых импульсов. Его можно значительно уменьшить, используя в качестве передатчиков лазеры с внешней модуляцией, что нашло практическое применение во всех современных высокоскоростных системах передачи.

Дальнейшее увеличение скорости передачи с помощью технологии ВРК требует разработки и внедрения исключительно сложных и дорогостоящих

электронных компонентов. Вся стоимость их разработки ложится на оптическую промышленность, так как в других областях (например компьютерные технологии) эти скорости еще не достигнуты. Требования к точности синхронизации сигналов систем передачи, предъявляемые при модуляции тока лазеров, мультиплексировании и демультиплексировании электрических сигналов на сверхвысоких частотах, очень высоки.

Поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion), так же как и хроматическая дисперсия, приводит к уширению импульсов и начинает заметно влиять на качество передачи при высоких скоростях (частотах модуляции). PMD возникает из-за того, что оптическое излучение с различными состояниями поляризации оптического сигнала распространяется вдоль волокна с различными скоростями. Это стохастическое явление, поэтому снижать влияние PMD особенно сложно. Известные практические способы не позволяют полностью компенсировать PMD в волокне [6].

1.1. Спектральное мультиплексирование

Мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM), называемое также волновым мультиплексированием или спектральным разделением, напоминает хорошо известное мультиплексирование с частотным разделением каналов, но только выполняемое в оптической среде передачи. Развитием этой технологии стало «плотное» WDM (dense WDM, DWDM).

Долгое время в WDM-системах использовались два-четыре канала, отстоящих друг от друга на десятки и сотни нанометров. Между тем еще с середины 80-х годов разработчики пытались радикально увеличить данный параметр. Появление технологии DWDM позволило формировать в одном волокне десятки каналов и вести передачу с суммарной скоростью более 1 Тбит/с [7].

Первые эксперименты с DWDM датируются 1985 г., когда удалось мультиплексировать 10 каналов по 2 Гбит/с, длины волн которых отстояли друг от друга на 1,3 нм. В лабораторных условиях скорости передачи достигли 1 Тбит/с в 1996 г., когда выходные сигналы 25 инжекционных лазеров расщеплялись на две составляющие с различной поляризацией, а затем полученные 50 несущих сигналов модулировались со скоростью 20 Гбит/с. Передача велась на расстояние 55 км с использованием диапазона 1550 нм.

Хотя теоретические основы технологии DWDM весьма просты, техническая реализация идеи сталкивается со значительными трудностями. Достижение ее коммерческого уровня позволила разработка широкополосных оптических усилителей на основе оптоволокна, легированного эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) [8].

Сегодняшние телекоммуникационные сети немыслимы без системы управления. Поэтому все современные DWDM-системы включают интегрированные средства сетевого администрирования, удовлетворяющие стандартам МСЭ-Т для Telecommunication Management Network (TMN). Такие системы для управления используют служебные оптические каналы, независимые от рабочих каналов DWDM [9].

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.

Фотонные сети 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 для 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.

1.2. Технология WDM

Технология WDM позволяет заметно повысить эффективность использования суммарной пропускной способности оптического волокна.

Обычное оптическое волокно имеет три окна прозрачности в инфракрасной области, их центральные длины волн равны 850, 1300 и 1550 нм. Для передачи на большие расстояния используются только диапазоны 1300 и 1550 нм, характеризующиеся минимальным затуханием сигналов (рис. 1).

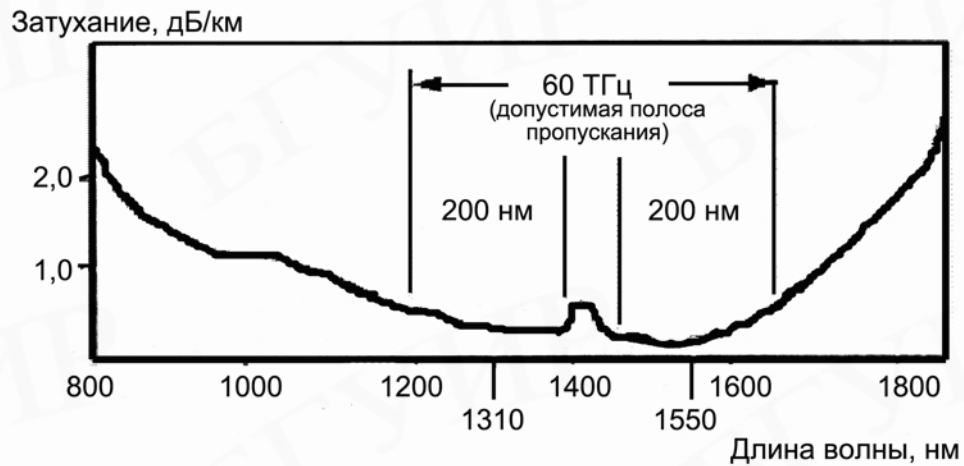


Рис. 1

Ширина каждого из этих двух диапазонов составляет 200 нм, что в сумме приблизительно эквивалентно частотному интервалу в 60 ТГц. При оценке пропускной способности волоконно-оптического канала обычно принимают, что на каждые 1 Гбит/с требуется 2 ГГц полосы пропускания. При таком подходе 60 ТГц становятся эквивалентными пропускной способности 30 Тбит/с, однако не учитываются ограничения приемопередающей аппаратуры, которая формирует канал передачи данных. Если, например, время срабатывания фотоприемника равно 1 нс, то скорость передачи трафика по каналу не превысит 1 Гбит/с, какой бы широкой ни была полоса пропускания волокна. Пропускная способность канала определяется такими характеристиками приемопередающих устройств, как максимально достижимая скорость модуляции передатчика и способность фотоприемника быстро и точно распознавать биты данных. Сегодня скорость передачи по каналу дальней связи, на которую может рассчитывать пользователь, составляет около 2,4 Гбит/с, а в отдельных случаях – 10 Гбит/с. Это означает, что из 60 ТГц потенциальной полосы пропускания канала на практике используется не более 20 ГГц. Если же разделить общую полосу пропускания на множество частотных каналов, скорость передачи каждого из которых сохранится на прежнем уровне, то объем данных, передаваемых по волокну в единицу времени, увеличится. Именно этот подход реализован в технологии WDM.

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных ВРК. Для повышения пропускной способности вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии ВРК, в технологии WDM увеличивают число каналов (длин волн), применяемых в системах передачи.

Рост пропускной способности при использовании технологии WDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля. Применение технологии WDM позволяет сдавать в аренду не только оптические кабели или волокна, но и отдельные длины волн, т.е. реализовать концепцию «виртуального волокна». По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения – информацию кабельного телевидения, те-

лефонии, Интернета, «видео по требованию» и т.д. Как следствие этого часть волокон в оптическом кабеле можно использовать для резерва.

Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку оптических кабелей в существующей сети. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого. Для ее эффективного использования необходимо иметь возможность в течение долгого времени увеличивать пропускную способность сети и менять набор предоставляемых услуг без замены оптического кабеля. Технология WDM предоставляет именно такую возможность.

Технология WDM пока применяется в основном на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания. Сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения потенциально также являются широким рынком для технологии WDM. Необходимость эффективно использовать проложенный кабель привела к значительному увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению расстояния между ними. В настоящее время системы с частотным интервалом между каналами 100 ГГц (~0,8 нм) и меньше называют системами плотного волнового мультиплексирования DWDM. Теоретически возможна передача в любом диапазоне длин волн, однако практические ограничения оставляют для использования в системах WDM узкий диапазон в окрестности длины волны 1550 нм. Но даже этот диапазон предоставляет огромные возможности для передачи данных.

Многочисленные преимущества систем WDM отражаются на их цене. Во-первых, становятся исключительно важными многие свойства оптических компонентов и характеристики оптического кабеля. Во-вторых, требования к архитектуре сети и выбору компонентов систем WDM являются более жесткими, чем, например, для систем ВРК уровня STM-16.

Совместное применение технологий ВРК и WDM позволяет значительно расширить спектр предоставляемых услуг, оставляя практически без изменений большую часть имеющегося оборудования. Применение технологии WDM дает многочисленные преимущества, однако требует высокого уровня подготовки технического персонала и современного контрольно-измерительного оборудования.

1.3. Технология DWDM

Система DWDM во многом похожа на традиционную систему ВРК. Сигналы разных длин волн, генерируемые одним или несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором в многоканальный со-

ставной оптический сигнал, который далее распространяется по оптическому волокну. При больших расстояниях передачи на линии связи устанавливается один или несколько оптических повторителей. Демультимплексор принимает составной сигнал, выделяет из него исходные каналы разных длин волн и направляет их на соответствующие фотоприемники. На промежуточных узлах некоторые каналы могут быть добавлены или выделены из составного сигнала посредством мультиплексоров ввода/вывода или устройства кросс-коммутации.

Главным отличием систем DWDM от систем ВРК является то, что в системе DWDM передача ведется на нескольких длинах волн. Важно отметить, что на каждой длине волны в системе DWDM может передаваться мультиплексированный сигнал систем ВРК.

Система DWDM в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких оптических усилителей, мультиплексоров ввода/вывода, оптического волокна (кабеля), демультимплексора и соответствующего числа фотоприемников, а также электронного оборудования, которое обрабатывает передаваемые данные в соответствии с используемыми протоколами связи и системы сетевого управления.

Экономически эффективная поддержка разнообразных услуг со стороны транспортной фотонной сети, несомненно, будет высокой при использовании интегрированных ATM/IP/SDH/DWDM сетевых решений. Основой транспортной сети становятся волоконно-оптические линии с системами спектрального уплотнения DWDM. Эти системы на магистральных линиях с протяженностью участка регенерации при использовании оптических усилителей до 900 км обеспечивают передачу сигналов на 40 и 80 длинах волн по одному ВС [5].

Возможности систем DWDM настолько впечатляющи, что позволяют говорить о достижении суммарной пропускной способности в линии связи на одном ВС на уровне до 10 Тбит/с и выше. По оценкам зарубежных специалистов, стремительный рост потребностей в объемах информационных потоков и новых услугах связи (в первую очередь Интернет) потребует к 2005 г. общей полосы пропускания около 300 Тбит/с (предельная возможность волоконных световодов оценивается также этой величиной) [5].

1.4. Взаимодействие систем WDM и DWDM с транспортными технологиями

Формально для систем WDM неважно, какие методы кодирования и формирования конкретного цифрового сигнала использовались. Хотя, как правило, в этих системах и передается однотипный трафик, это диктуется ис-

пользуемыми методами синхронизации и единообразием процесса обработки. В отличие от систем SDH транспортируемый сигнал не упаковывается в контейнеры и не подвергается обработке в соответствии со структурой мультиплексирования SDH для формирования транспортного модуля STM-N, который только и может быть передан через физический уровень в канал связи (среду передачи). Если упрощенно представить многоуровневую модель взаимодействия основных технологий SDH, ATM, IP (без учета возможности переноса IP через ATM), осуществляющих транспортировку сигнала в глобальных цифровых сетях, и WDM, то до появления последней она имела вид, представленный на рис. 2,а. Модель состояла из трех уровней и оптической среды передачи и показывала, что для транспортировки трафика верхнего уровня (ATM и IP) по оптической среде передачи он должен быть размещен (инкапсулирован) в транспортные модули STM-N технологий SDH, способные, используя физический интерфейс этих технологий, пройти через физический уровень в оптическую среду передачи. Отсюда была ясна необходимость создания технологий инкапсуляции ячеек ATM, например, в виртуальные контейнеры SDH (ATM over SDH), или пакетов IP в виртуальные компоненты (IP over SDH). Этим и занимались соответствующие подкомитеты по стандартизации в таких институтах, как ANSI, ISO, МСЭ-Т и ETSI, разрабатывая стандарты на указанные технологии [10].

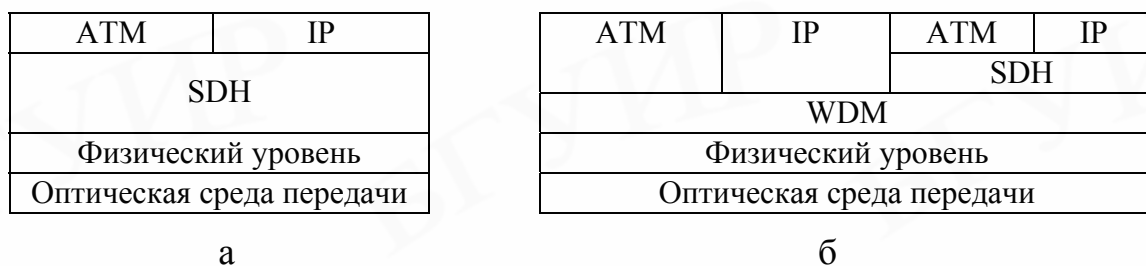


Рис. 2

После появления систем WDM модель принимает вид, представленный на рис. 2,б. Теперь модель имеет четыре уровня, не считая оптической среды передачи. Появился промежуточный уровень WDM, который, как и SDH, обеспечивает физический интерфейс, позволяющий через физический уровень выйти в оптическую среду передачи не только технологии SDH, но и технологиям ATM и IP. В последнем случае не требуется инкапсуляции ячеек ATM или пакетов IP в промежуточный транспортный модуль технологий SDH, что не только упрощает процедуру обработки и транспортировки трафика, генерируемого системами ATM и IP, но и существенно уменьшает общую длину заголовков (которые пристыковываются по мере прохождения с верхнего уровня на нижний), повышая процент, занимаемый информационной составляющей трафика, в общей длине передаваемого сообщения, а значит, и эффективность передачи в целом. Естественно, что ATM и IP трафик может быть передан и по традиционной схеме с использованием SDH, трафик

которых может быть также передан с помощью систем WDM, что сохраняет преимущество старых схем транспортировки и увеличивает гибкость комбинированных систем WDM-SDH в целом.

При рассмотрении сценария развития широкополосных сетей было отмечено, что технология DWDM (совместно с SDH) может сыграть свою важную роль в постепенной миграции сетей к полной IP-совместимости. Другим многообещающим новшеством в сетях будущего должна стать так называемая «мультипротокольная лямбда-коммутация», которая является дальнейшим развитием технологии, известной под аббревиатурой MPLS (Multi protocol label switching). Лямбда-коммутация, фактически уже доступная для внедрения, заменяет обычный заголовок в IP-формате на короткую метку, тем самым увеличивая скорость обработки информационных данных. Мультипротокольная лямбда-коммутация вносит элемент интеллектуальности в сферу оптических телекоммуникаций, в частности, передающий центр теперь может выбирать наиболее короткий и высокоскоростной путь между двумя маршрутизаторами, что позволяет оптимизировать работу сети в целом. Более того, поскольку эта технология разработана на основе MPLS, вопросы о том, каким образом IP-маршрутизатор будет взаимодействовать с оптической средой передачи, как развивать дальнейшую стратегию перехода к полностью оптическим IP-совместимым сетям, решаются сами собой.

Несмотря на то, что будущее за IP-совместимыми сетями, DWDM будет продолжать развиваться и совершенствоваться как самостоятельная технология передачи в соотношении увеличения количества длин волн, используемых при мультиплексировании. А поскольку пропускная способность была и остается важнейшей проблемой многих операторов связи, роль DWDM как технологии, обеспечивающей поступательное развитие широкополосных мультисервисных сетей, сохранится еще в течение длительного времени.

1.5. Канальный (частотный) план

Самым важным параметром в технологии DWDM (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 Международного союза по электросвязи (МСЭ-Т) утвердил частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц ($\Delta\lambda \approx 0,8$ нм). В то же время большие 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 организа-

ции, планирующие наращивание пропускной способности сети, могут столкнуться со значительными трудностями и излишними инвестициями.

Сетка частот 100 ГГц. Равномерное распределение каналов дает возможность оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств фотонной сети, а также позволяет легче выполнять ее наращивание. Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от трех основных факторов: типа используемых оптических усилителей (кремниевого или фторцирконатного), 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.

Сетка частот 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 усилители. Наряду с этим преимуществом у данной сетки есть и минусы. 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 $\sim 0,4$ нм может приводить к ограничениям в возможности мультиплексирования каналов STM-64 (рис. 3).

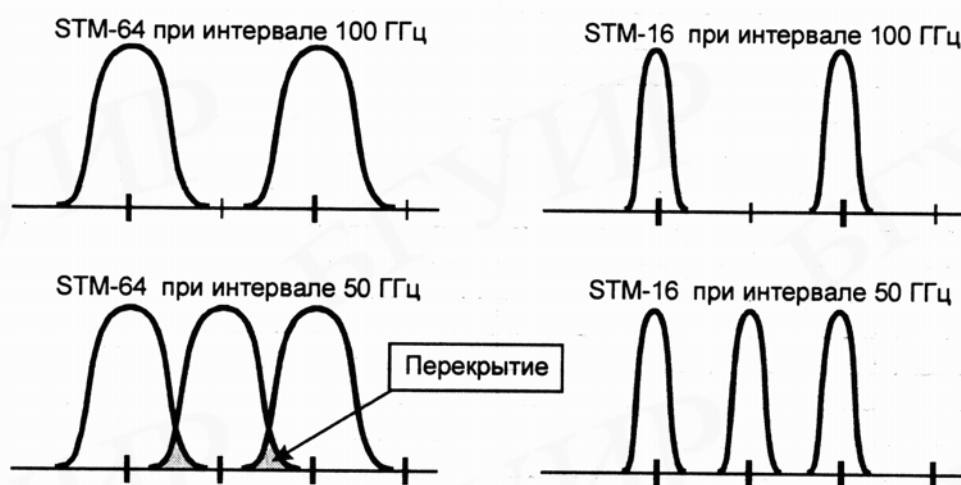


Рис. 3

Возникает перекрытие спектров соседних каналов. Только если имеет место меньшая скорость передачи в расчете на канал (STM-4 и ниже), перекрытия 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.

2. Компоненты фотонных систем и сетей телекоммуникаций

Вводные замечания

Для передачи больших потоков информации (1 Гбит/с и более) 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 пять-восемь 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. На протяжении последних нескольких лет в этой области ведутся интенсивные исследования, создается более совершенное оборудование, строятся прототипы архитектур, вырабатываются стандарты.

2.1. Источники излучения

Очевидно, что реализация технологии DWDM невозможна без стабильного узкополосного и когерентного источника излучения. Современные лазеры, излучающие когерентный свет в очень узком диапазоне частот, формируют в фотонной сети индивидуальные виртуальные оптические каналы. Обычно в системах с дальней связью используются лазеры с внешней модуляцией, в то время как для ближней связи – с внутренней модуляцией. Лазер может быть модулем WDM-системы или встроенным в блок системы верхнего уровня, например, элементом SDH. В первом случае WDM-система называется открытой. Такие системы имеют стандартизованные оптические интерфейсы, благодаря чему можно подключать к ним разнообразных клиентов. Каждый из сигналов преобразуется в луч с уникальной длиной волны и поступает в мультиплексор, а затем – в оптическую среду передачи. Во втором случае WDM-система называется закрытой. Она, напротив, не позволяет другим клиентам, кроме предусмотренных проектом, разделять полосу пропускания канала.

Современные оптические передатчики имеют гибридную конструкцию. Лазеры и интегральные микросхемы, модулирующие излучение, объединены в единый компактный модуль, что позволяет достичь больших частот модуляции и высокой надежности. Такой модуль представляет собой электронно-оптический преобразователь, в котором интенсивность выходного оптического сигнала модулируется входным цифровым электрическим сигналом. Пере-

датчик для одного оптического канала обычно представляет собой лазер с распределенной обратной связью (РОС) с выходной мощностью не менее 1 мВт (0 дБм) и оптический модулятор (при частотах модуляции свыше 2,5 ГГц – внешний).

Методами интегральной оптики созданы недорогие и удобные в эксплуатации оптические передающие модули, объединяющие в одном кристалле лазер, оптический модулятор и полупроводниковый лазерный усилитель (ПЛУ). Разработаны также оптические передающие модули, объединяющие мультилазеры, независимо генерирующие сигналы на нескольких длинах волн.

Модуль оптического передатчика с РОС-лазером обычно содержит также термоэлектрическое охлаждающее устройство для контроля температуры, датчик температуры, оптический изолятор и фотодиод для контроля уровня мощности. РОС-лазеры требуют жесткого температурного контроля, так как длина волны генерации очень чувствительна к изменению температуры.

Для систем DWDM достаточно обеспечить на практике температурную стабилизацию лазеров оптических передатчиков в пределах $\pm 0,1^\circ\text{C}$, что позволяет поддерживать стабильность длины волны в пределах $\pm 0,01$ нм. Эффективность промышленных РОС-лазеров достаточно высока – выходная мощность 1 мВт обеспечивается при токе накачки до 40 мА [4].

Проблема реализации систем со сверхвысоким быстродействием заключается в получении решеток с несколькими одночастотными лазерами, излучающими на разных длинах волн. Однако применение таких решеток сдерживается трудностями, связанными с формированием дифракционной решетки первого порядка с четвертьволновым сдвигом. Для получения сложной решетки впервые был применен метод рентгенолитографии. Предполагается, что этот новый метод изготовления одночастотных лазеров найдет широкое применение при создании усилителей, модуляторов и фильтров для высокоскоростных ВОСП.

Лазеры, активная среда которых является периодической структурой, отражающей генерируемое излучение InGaAsP/InP РОС, – гетеролазеры с длиной волны генерации 1,5–1,6 мкм являются наиболее подходящими источниками излучения для сверхвысокоскоростных ВОСП большой протяженности. В инжекционных лазерах применение периодических структур (фазовых решеток) вместо зеркальных резонаторов дает возможность кроме сужения линии генерации и уменьшения угла расходимости совместить лазер с другими элементами интегральных схем. Использование дифракционных решеток сопровождается, как правило, уменьшением порога генерации и увеличением мощности излучения. Еще более эффективными для создания фотонных систем могут быть квантово-размерные лазеры, толщина слоев которых сравнима с длиной волны де Бройля для электронов или дырок. Качественное уменьшение размеров вещества приводит к качественному изменению его квантово-механических, а также оптических и электрических свойств.

Увеличивается ширина запрещенной зоны, снимается вырождение зон для дырок, уменьшается ширина спектра излучения. Так, в научном коллективе академика Ж.И. Алферова созданы квантово-размерные лазеры с пороговым током генерации около 1 мА.

Для систем DWDM в настоящее время принят частотный план МСЭ-Т G.692 с разносом каналов 100 ГГц, что соответствует величине между спектральными составляющими 0,8 нм, и 50 ГГц, или 0,4 нм [8]. Поскольку ППЛ являются ключевыми элементами системы, специфика DWDM предъявляет к их параметрам следующие требования [4]:

- длина волны излучения оптического сигнала должна соответствовать частотному плану МСЭ-Т G. 692;
- ширина спектра излучения не более 1 ГГц;
- точность и стабильность установки длины волны не хуже 10^{-6} .

В настоящее время наиболее широко используются РОС-лазеры, ППЛ с распределенной брегговской решеткой (БР) и лазеры на вертикальных резонаторах (VCSEL – Vertical-cavity surface-emitting laser). Преимущество короткого высокодобротного резонатора в VCSEL состоит в одночастотном режиме генерации и высокой технологичности: на одном чипе можно разместить матрицу лазеров, каждый из которых излучает заданную длину волны, согласно сетке частот.

Для коммутации оптических информационных потоков и управления топологией сети в DWDM-системах необходимо использовать перестраиваемые лазеры.

2.2. Оптические кабели

Все оптические кабели разделяются на две категории: небронированные (для прокладки в пластмассовых трубах методом пневмопротяжки и в кабельной асбоцементной канализации) и бронированные (прокладываются в грунте на песчаной подушке и в районах, изобилующих грызунами; защита от грызунов – стальная ленточная броня). Число оптических волокон – от 4 до 1000. Обычно конструкция модульная. Центральный силовой элемент (ЦСЭ) – диэлектрический или стальная проволока с полиэтиленовым покрытием.

Есть несколько видов волоконно-оптических кабелей (ВОК):

- трубчато-модульные ВОК – многомодульные. ЦСЭ – диэлектрический (против арамидных нитей) или металлический (стальная проволока с полиэтиленовым (ПЭ) покрытием). Периферийный силовой элемент (ПСЭ) также диэлектрический. Общее число модулей – от 2 до 24 по 12 волоконных световодов (ВС) в каждом, т.е. в ВОК общее число ВС от 24 до 288;

- ленточно-трубчатые ВОК. В одном ряду – 12 ВС. Ленточные элементы формируются в блоки (трубки). ЦСЭ – диэлектрический. Общее число ВС от 288 до 864;

- ленточно-профильные ВОК – от 600 до 1000 ВС – применяются на ГТС. Наружный диаметр ВОК от 10 до 40 мм;

- ВОК для ведомственных и корпоративных сетей. Прокладываются не только между зданиями, но и внутри них по вертикальным стволам. Трубка модуля имеет от 2 до 24 ВС. Кабели прокладываются в пластмассовых трубах методом пневмопротяжки и в асбоцементной канализации. Наружный диаметр ВОК от 6,5 до 10 мм.

В модулях от 8 до 96 кабели, содержащие 600 и 1000 ОВ, применяются на ГТС. Диаметр (внешний) 22...25 мм.

Микрокабели до 144 ВС – с внешним диаметром 9,6 мм (для прокладки в асфальтовом покрытии тротуара или проезжей части пропиливаются канавки глубиной 8 см, и в них укладывается кабель. Кабель заключается в медную трубку, канавки заливаются обычным битумом).

Большинство одномодовых ВС не подходят для плотного волнового мультиплексирования, но фирма Corning выпустила в 1998 г. одномодовый кабель LEAF, а компания Lucent Technologies – одномодовые волокна со смещенной нулевой дисперсией типа True Wave, которая обеспечивает передачу сигналов (без регенерации) на огромные расстояния.

При нулевой дисперсии в ВС ярко проявляются нелинейные эффекты – четырехволновое смешивание, резко ограничивающее длину регенерационного участка. [9]. Суть этого эффекта заключается в том, что при введении в ВС оптического излучения на двух длинах волн λ_1 и λ_2 регистрируется на выходе оптическое излучение на четырех длинах волн.

Специфика городских условий – большое число терминалов и абонентов, отсутствие сконцентрированных в одном месте потоков информации, требует иного подхода, чем на магистральных линиях связи, где применяется плотное спектральное уплотнение (DWDM, где расстояние между каналами составляет 0,2...0,8 нм и где применяются дорогие прецизионные системы мультиплексирования). Технология CWDM («разреженное» спектральное уплотнение) – недорогая альтернатива сложным DWDM-системам, не требующая узкополосных оптических фильтров и специально подобранных лазеров с температурной стабилизацией. В то же время создаваемые с ее помощью в существующей кабельной сети 16 спектральных каналов в рабочем диапазоне 1310... 1610 нм позволяют многократно расширить пропускную способность волокна в городских условиях, где сейчас используется только один канал (1310 нм или, чаще, 1550 нм). Хотя системы CWDM работоспособны и на базе волокон категории G.652 (широко известное волокно Corning SMF-28™), наилучшие характеристики достигаются при использовании специальных волокон: SMF-28™e и MetroCor™.

Волокно SMF-28™e. Обычные одномодовые волокна SMF-28™ доступны в варианте с низкими потерями в области водяного пика (как уже было сказано, сейчас идет полная замена предыдущего варианта новым). Появление

ние техники CWDM стимулировало создание специальной разновидности SMF-28™ с низким затуханием $\leq 0,31$ дБ/км на длине волны 1383 нм. Основная разница – в нечувствительности SMF-28™е к воздействию водорода, способного диффундировать в материал сердцевины волокна и образовывать ионы гидроксидов на свободных кислородных связях (механизм роста затухания в стандартных волокнах на 1383 нм). Испытания SMF-28™е на воздействие к водороду, проводимые по методу, описанному в МЭК 60792-2, фиксируют прирост затухания менее 0,01 дБ/км.

Новая разновидность волокна открывает дорогу CWDM-технологии в полном объеме. На рис. 4 показаны кривые затухания волокон SMF-28™ и SMF-28™е, первое с водяным пиком на 1383 нм, второе – без. Волокно SMF-28™е позволяет надежно передавать сигнал во всех 16 каналах, тогда как для обычных волокон открыты 12 из упомянутых.

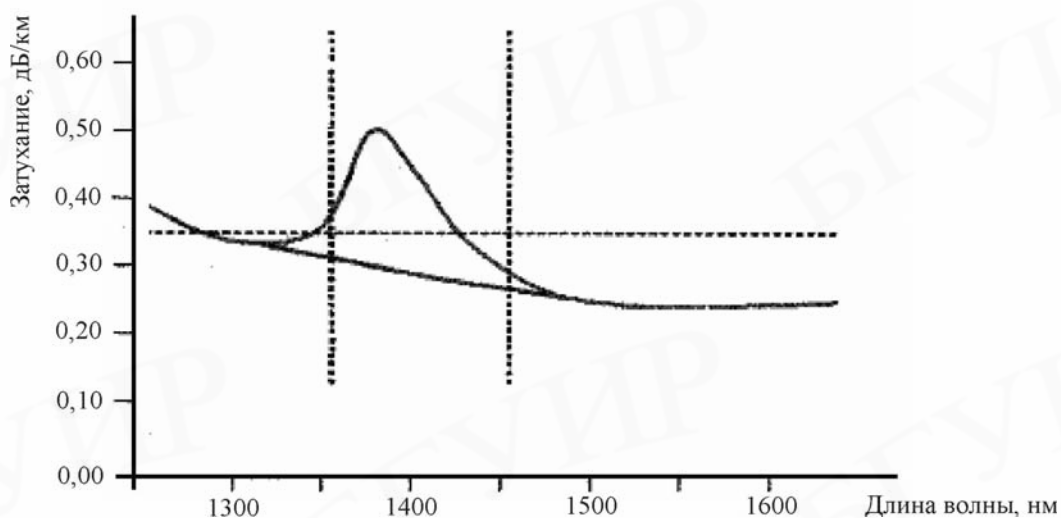


Рис. 4

Волокно MetroCor™. Экспоненциальный рост потребности в пропускной способности линий связи во всем мире не оставляет другого выбора, кроме разработки новых технологий, причем начальные сложности перехода к этим новым технологиям быстро компенсируются экономической выгодой и гибкостью предоставляемых услуг. Поэтому основной причиной внедрения систем спектрального уплотнения каналов (WDM) на оптических линиях связи является многократное увеличение передающей способности волокна за счет передачи информации на многих длинах волн. WDM впервые зарекомендовало себя как наиболее эффективный метод увеличения скорости передачи в сетях дальней связи. Подтверждением тому является большой коммерческий успех волокна LEAF™, оптимизированного для таких линий. Теперь становится ясным, что применение WDM в сочетании с оптической коммутацией длин волн, ведущее к созданию фотонных сетей, предоставляет не менее революционные возможности для операторов сетей связи в районах с большой концентрацией потребителей для передачи на расстояния 100–400 км

(назовём это развитием городской и зонной связи). Фотонная сеть позволяет облегчить решение проблемы совместимости электронной части сети, так как коммутация осуществляется без перевода сигнала в электрическую форму. Появляется возможность предоставлять в аренду не только отдельные волокна, но и выделенные длины волн внутри волокна.

По мнению специалистов компании Corning, оптимальным решением для WDM городских оптических сетей является использование спектрального диапазона 1550 нм (речь идет о работе в полосе длин волн 1530...1625 нм), где сегодня есть все необходимое для работы при скорости передачи 2,5 Гбит/с. В диапазоне 1550 нм можно использовать хорошо отработанные устройства и очевидные преимущества оптических усилителей. Поскольку внедрение фотонных сетей ведёт к увеличению средней дальности передачи без перевода сигнала в электрическую форму, ключевое значение приобретает проблема дисперсии сигнала в стандартном волокне, которая вблизи 1550 нм существенно ограничивает расстояние передачи WDM оптического сигнала, в лучшем случае величиной порядка 100 км. При этом затухание компенсируется оптическим усилением. Сформулированные выше соображения и стали основанием для разработки нового волокна MetroCor™, свойства которого оптимизированы для волн 1530–1625 нм. Сказанное выше не означает, что волокно MetroCor™ непригодно для работы в диапазонах 1300 и 1400 нм, в том числе и в составе CWDM-систем. Достаточно сказать, что такие факторы, как низкая величина длины волны отсечки, низкое затухание в пике воды и ненулевая дисперсия, позволяют обеспечить нормальную работу и подавление перекрестных нелинейных искажений во всех рабочих диапазонах от 1280 до 1625 нм. Применение волокна MetroCor™ компании Corning позволит убрать дисперсионные ограничения при передаче на расстояния до 400 км и обеспечить максимальную экономическую эффективность и гибкость архитектуры таких сетей.

2.3. Оптические усилители

Вводные замечания

Потери мощности в линии преодолеваются путем оптического усиления (рис. 5). 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 вступят в силу другие ограничивающие факторы, такие как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия. Оптические усилители (ОУ) способны усиливать многоканальный WDM-сигнал, добавляя еще одно измерение в пропускную способность систем.

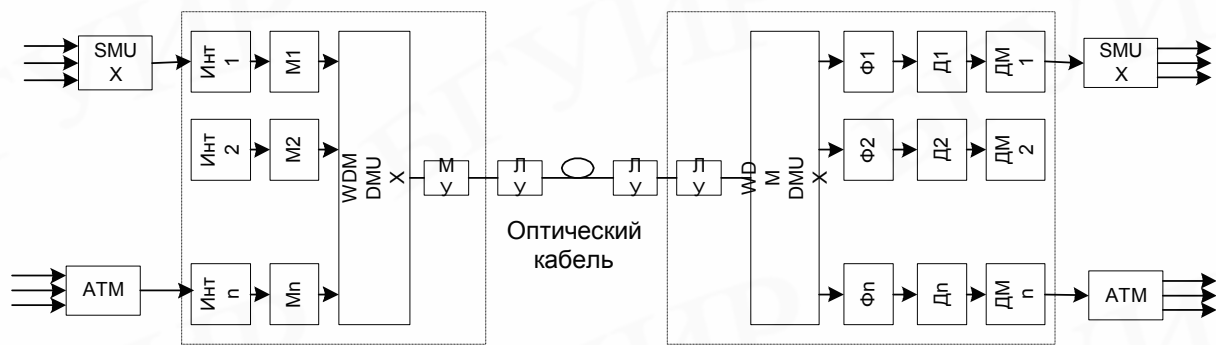


Рис. 5

Оптические усилители обладают поистине уникальными характеристиками. Они почти не шумят, имеют очень малые интермодуляционные искажения и вдобавок очень высокую чувствительность. В результате они могут усилить практически любой оптический сигнал в полосе трехтерагерцевого рабочего диапазона, а нелинейные искажения, даже если они и возникнут в одном из каналов, скорее всего не скажутся на работе других частотных каналов.

Другим преимуществом оптических усилителей является их универсальность: в отличие от регенераторов здесь не имеют значения протоколы, способы модуляции и другие тонкости, присущие данной конкретной линии передачи данных, да это и не нужно.

2.3.1. Основные параметры оптических усилителей

Для оптических усилителей можно использовать те же термины и параметры, что и для электронных усилителей:

- коэффициент усиления;
- коэффициент шума;
- динамический диапазон;
- амплитудно-фазовую характеристику (АФХ).

Однако они имеют и свои (для ряда применений существенные) параметры:

- коэффициент усиления среды;
- мощность насыщения;
- усиленное спонтанное излучение (УСИ);
- чувствительность к поляризации сигнала;
- амплитудно-волновую характеристику (АВХ).

В общем случае коэффициент усиления оптического усилителя для одного сигнала на центральной частоте имеет вид

$$G_0(\omega) = \frac{P_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{P_{\text{ВХ}}(\omega)},$$

где $P_{\text{ВХ}}(\omega)$ и $P_{\text{ВЫХ}}(\omega)$ – мощность оптического сигнала на входе и выходе усилителя, измеренные на рабочей угловой частоте (или соответствующей длине волны) при малом уровне входного сигнала, гарантирующем отсутствие насыщения выходного сигнала.

Основным активным агентом оптических усилителей является фотон, следовательно, идеальный оптический усилитель с коэффициентом усиления K должен синфазно генерировать на выходе ровно K фотонов на каждый фотон, попавший на его вход, т.е. оптический усилитель должен пропорционально усиливать интенсивность входного оптического сигнала, оставляя его форму неизменной, независимо от его интенсивности, длины волны, состояния поляризации, формы отображаемой двоичной последовательности. Фактически же указанные факторы, а также ряд других факторов влияют на АФХ усилительной (или активной) среды $g(\omega)$ или ее частотный спектр, а затем уже на АФХ собственно ОУ.

2.3.2. Коэффициент усиления среды и усилителя

Практика показывает, что большинство оптических усилительных (активных) сред можно рассматривать как однородную распределенную двухуровневую среду, для которой коэффициент усиления среды на единицу длины может быть описан выражением вида

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + \delta\omega^2 T_D^2 + \frac{P_C}{P_H}}, \quad (2.1)$$

где g_0 – максимальное (вычисленное для малого входного сигнала) значение коэффициента усиления, зависящее от мощности накачки; $\delta\omega$ – разность частоты входного оптического сигнала и частоты квантового перехода электронов с верхнего уровня на нижний; T_D – время релаксации диполей вещества активной среды, определяемое скоростью перехода из одного равновесного состояния в другое (имеет порядок 0,01-1 нс, в зависимости от типа диполей); P_C – оптическая мощность входного сигнала; P_H – мощность насыщения.

2.3.3. Мощность насыщения

Аналогично электронным усилителям модуль усиления ОУ зависит от уровня входного сигнала. До определенного (малого) уровня мощности уси-

ление практически постоянно, затем оно начинает экспоненциально падать (рис. 6) с ростом уровня входной мощности. Этот «падающий» участок характеристики является областью насыщения усилителя и объясняется уменьшением коэффициента размножения, вызванным возрастающим с ростом входного сигнала дефицитом частиц, которые способны генерировать вторичные фотоны, на том уровне, где создается инверсия населенности. Эта область численно характеризуется мощностью насыщения P_H на выходе усилителя, определяемой по выходной характеристике на уровне -3 дБ·м, при котором коэффициент усиления среды $g(\omega)$ падает в два раза.

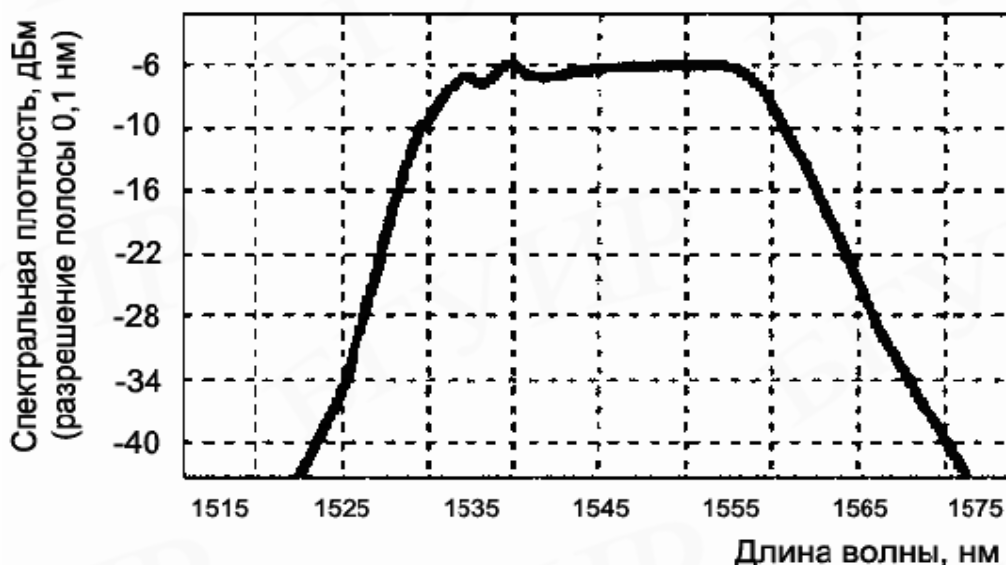


Рис. 6

Амплитудно-фазовая характеристика ОУ зависит от ряда специфических для ОУ параметров, влияние основных из них оценено ниже.

Влияние насыщения на АФХ обусловлено третьим слагаемым в выражении (2.1), которое может приводить к существенному снижению усиления среды в целом, даже в области, казалось бы, далекой от насыщения. Являясь ограничительным фактором, насыщение может играть и регулируемую роль в стабилизации общего коэффициента усиления при каскадном соединении многих усилителей в линии связи, что имеет место, например, на трансокеанских линиях связи.

Из выражения (2.1) видно, что влияние времени релаксации диполей на АФХ определяется двумя слагаемыми в знаменателе. Если принимать во внимание зависимость от частоты только второго слагаемого, то грубо, в первом приближении, ее можно аппроксимировать профилем Лоренца. Тогда, используя его, можно получить, что полная ширина спектра на уровне T_d

$$\Delta\omega_G = \frac{2}{T_d},$$

т.е. половина от максимума, обратно пропорциональна мощности усиливаемого оптического сигнала и зависит от длины участка среды L от точки входа

потока сигнала в усилитель до его выхода. С учетом этого АФХ усилителя при условии постоянного коэффициента усиления среды $g(\omega)$ будет иметь вид

$$G(\omega) = e^{g(\omega)L}.$$

Учитывая экспоненциальный характер этой зависимости, можно констатировать, что спектр $G(\omega)$ усилителя будет существенно уже спектра $g(\omega)$ среды, что и видно на рис. 6, где приведены нормированные характеристики $G(\omega)$ и $g(\omega)$ в зависимости от расстройки $(\omega - \omega_0)$.

Еще одним ограничивающим коэффициентом усиления G фактором является чувствительность усиления ОУ к поляризации усиливаемого сигнала, когда усиление может меняться, и иногда значительно, в зависимости от поляризации. Ситуация ухудшается в ВОЛС, так как в них состояние поляризации сигнала не только не контролируется, но и в волокне, даже одномодовом, может хаотически меняться под действием случайных изменений формы сердцевины и анизотропии, вызванной статическим напряжением отрезка оптоволокна (эффекты, известные, применительно к одномодовому ОВ, как модовое двойное лучепреломление). Аналогично страдают и системы с WDM, в которых степень поляризации входных сигналов может быть различной.

Изменение поляризации приводит к паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) усиления, которая может носить периодический характер (как, например, для усилителей бегущей волны). Степень такой чувствительности зависит от типа ОУ.

2.3.4. Источники шума и динамический диапазон

Динамический диапазон определяется как диапазон входной мощности оптического сигнала, при котором G остается постоянным. Он тесно связан с другим параметром – коэффициентом шума, зависящим от уровня усиленного спонтанного излучения, остаточного сигнала накачки и перекрестной помехи, которые кратко рассмотрены ниже.

Оптические усилители добавляют шум к усиливаемому оптическому сигналу. Этот шум обусловлен усиленным спонтанным излучением. Оно возникает под действием случайных возмущающих факторов различной физической природы, вызывающих спонтанное излучение, например, нагрева усилителя (тепловые фотоны), а также за счет наличия рассеянных фотонов. Шум приводит не только к уменьшению динамического диапазона, но и к снижению максимально допустимого усиления. Уменьшение динамического диапазона обычно характеризуется известным параметром F – коэффициентом шума:

$$F = \frac{\text{SNR}_{\text{ВЫХ}}}{\text{SNR}_{\text{ВХ}}},$$

где $SNR_{\text{ВЫХ}}$ и $SNR_{\text{ВХ}}$ – значения динамического диапазона на входе и выходе усилителя.

Оценка этого параметра оптических усилителей осуществляется на «электрическом уровне» путем преобразования оптического сигнала в электрический с помощью фотодетектора. Для уменьшения коэффициента шума, вызванного УСИ, сигнал на выходе ОУ фильтруют с помощью полосового оптического фильтра (ПОФ).

Существует и еще один специфический источник шума в усилителях с накачкой – остаточный сигнал накачки на выходе усилителя, влияние которого (на передатчик или детектор в системе связи) может быть уменьшено как с помощью фильтра на выходе ОУ, так и путем соответствующего выбора частоты источника накачки.

Перекрестные помехи характерны для многоканальных усилителей в системах WDM. Они проявляются как паразитные амплитудная или частотная модуляции сигнала одного канала другими сигналами.

2.3.5. Полупроводниковые оптические усилители

Существует два типа оптических усилителей: полупроводниковые и волоконно-оптические. Схема полупроводникового усилителя представлена на рис. 7. Здесь 1 – активная зона, представляющая собой лазерный полупроводниковый кристалл с «накачкой» электрическим током. Такая среда называется инверсной и может усиливать интенсивность излучения с резонансной частотой. Коэффициент усиления при этом пропорционален току накачки.

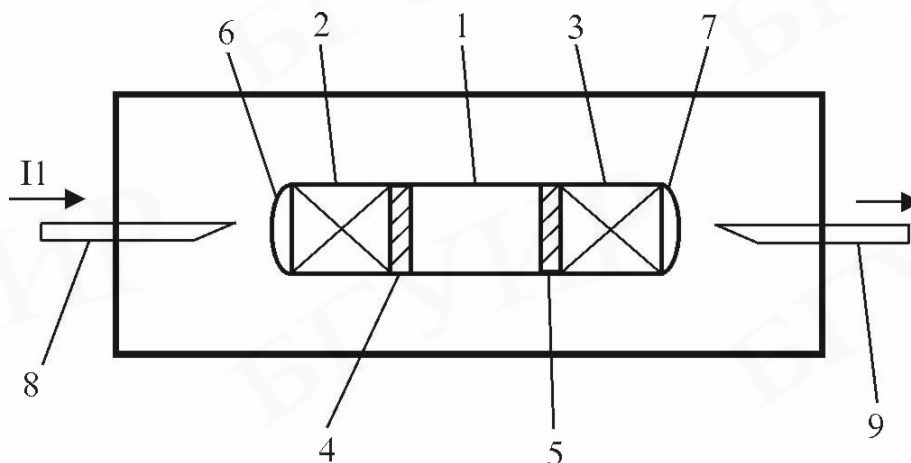


Рис. 7

В полупроводниковых усилителях, в отличие от лазеров, на входную и выходную грани полупроводникового кристалла 1 нанесены просветляющие многослойные покрытия 4 и 5 на рабочую длину волны. Эти покрытия фактически являются оптическими полосовыми фильтрами. Они необходимы для исключения положительной оптической обратной связи, которая может превратить усилитель в генератор, т.е. в лазер. Для этой цели также служат опти-

ческие изоляторы 2 и 3. Для уменьшения возможности попадания отраженного излучения торцы волокон 8 и 9 выполняются скошенными. Полусферические линзы 6 и 7 служат для фокусирования луча. Отметим, что в современных полупроводниковых оптических усилителях в качестве активной среды применяются так называемые квантово-напряженные структуры, практически нечувствительные к поляризации усиливаемого излучения.

Полупроводниковые лазерные усилители (ПЛУ) (см. рис. 7) еще недавно считались наиболее подходящими усилителями оптических сигналов только в окне длин волн 1300 нм, однако в последнее время появились сообщения об успешных разработках ПЛУ компании Alcatel и для окна 1550 нм, что особенно актуально, учитывая миграцию современных оптических систем в этот диапазон волн. Такие усилители основаны на использовании эмиссии, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного излучения с электронами на возбужденном уровне в зоне проводимости.

Полупроводник можно рассматривать при этом как идеально простую систему с двумя неперекрывающимися энергетическими уровнями: нижним (релаксационным) – валентная зона и верхним (возбужденным) – зона проводимости, разделенными определенным зазором – потенциальным барьером. Как и в общем случае, оптическое усиление возможно при условии создания определенного уровня инверсии населенности (здесь избытка электронов в зоне проводимости) за счет накачки, роль которой играет инжекция тока в полупроводник. Однако при этом энергия основной массы электронов еще недостаточна для преодоления потенциального барьера между зонами. Для этого требуется дополнительная энергия возбуждения. Входной сигнал – источник первичных фотонов – и служит таким источником возбуждения, энергия которого должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхнего уровня на нижний, где электрон и дырка рекомбинируют, вызывая появление вторичных фотонов. Если один первичный фотон вызывает эмиссию m вторичных фотонов, возникает m -кратное оптическое усиление.

Типы оптических усилителей

Оптические усилители, аналогично лазерам, используют принцип индуцированного излучения. Существуют пять типов оптических усилителей, перечень которых приведен в таблице.

Типы усилителей

Типы усилителей	Область применения
1	2
1. Усилитель с резонатором Фабри–Перо	Усиление одного канала (одной длины волны)
2. Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние	Усиление одного канала

1	2
3. Усилители, 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	То же

Усилители Фабри–Перо оснащены 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, такие усилители нечувствительны к поляризации оптического 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 демультимплексоров, поскольку они всегда могут быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM.

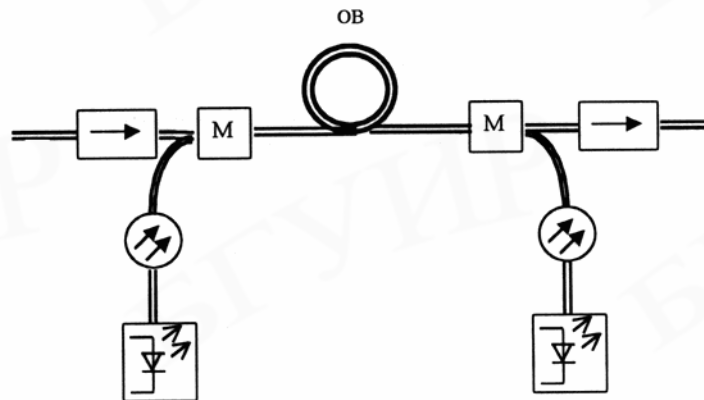


Рис. 8

В усилителях на волокне, использующих бриллюэновское рассеяние (рис. 8), благодаря нелинейному эффекту, возникающему в кремниевом волокне, энергия оптической волны на частоте f_1 переходит в энергию новой волны на смещенной частоте f_2 . При мощной накачке на частоте f_1 стимулированное бриллюэновское рассеяние способно усиливать входной слабый сигнал на частоте f_2 . Выходной сигнал сосредоточен в узком диапазоне, что позволяет выбирать канал с погрешностью 1,5 ГГц.

Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние, используют тот же нелинейный эффект, что и усилители с бриллюэновским рассеянием, однако в данном случае 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.

2.3.6. 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. 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.

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 нежелательно, 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 соответственно в этом же окне фильтр пропускает сигнал в приемном оптоэлектронном модуле, то вклад в мощность шума на выходе благодаря усиленному спонтанному излучению будет равен $ASE_{\Delta\nu} = ASE \Delta\nu$. Таким образом, оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в спектральном отношении отдельными каналами. Использование узкополосных фильтров непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем, настроенных на рабочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

3. Фотонные сети и их компоненты

Появившиеся стандартные фильтры DWDM и оптические усилители резко снизили цену волоконно-оптических информационных систем и сетей. Если раньше было необходимо копать траншеи и прокладывать в них дополнительные кабели, то теперь достаточно установить новое мультиплексирующее оборудование DWDM.

Смонтированная проводка на ВОК не дороже, чем на медных кабелях 6-й и 7-й категории. Оптические сети удастся теперь монтировать быстро и без существенных затрат. Они надежны и просты в эксплуатации, полностью защищены от электромагнитных помех и несанкционированного доступа.

ВОЛС – не только альтернатива медным проводам, но и единственно возможный способ построения быстрой и надежной сети с высокой пропускной способностью.

Для высокоскоростных приложений телекоммуникационных сетей жилых домов и офисных структур могут быть использованы пластиковые оптические кабели (Plastic Optical Fibre – POF), производимые компанией Boston Optical Fibre (США). Индустрия POF официально признана и поддержана Форумом ATM – организацией, специально учрежденной для содействия продвижению разработок, приложений, продуктов и систем обслуживания технологии ATM [15]. Форум ATM одобрил пластиковый оптический кабель с пропускной способностью 155 Мбит/с как физическую среду передачи данных, пригодную для использования в горизонтальных кабельных проводках длиной до 50 м.

Специалисты фирмы Optical Fibre считают, что их пластиковые оптические кабели с плавно изменяющимся показателем преломления, рассчитанные на передачу данных со скоростью 3 Гбит/с, найдут применение в цифровом телевидении, домашних и учрежденческих сетях связи.

Технологии POF с использованием фторполимеров могут быть использованы в диапазоне длин волн от 850 до 1300 нм [16].

Что касается сращивания оптических волокон, универсальным считается способ сварки на специальном аппарате. Однако высокая стоимость сварочных аппаратов стала причиной создания альтернативных технологий стыковки оптических волокон. Например, для быстрого соединения волокон используются специально разработанные механические соединители («сплайсы»). Это пластиковые устройства, состоящие из двух частей: корпуса и крышки. Внутри корпуса находится специальный желоб, в который с разных сторон вставляются соединяемые волокна, затем надевается крышка, являющаяся одновременно замком. Особая конструкция соединителя надежно центрирует волокна. Получается герметичное соединение волокон с потерями на стыке ~0,1 дБ. Такие соединители особенно удобны при быстром восстановлении поврежденной ВОЛС. Время на соединение двух волокон не превышает 30 с после того как волокна подготовлены (снято защитное покрытие, сделан строго перпендикулярный скол). Монтаж ведется без применения клея и специального оборудования, что очень удобно при работе в труднодоступном месте (например в кабельном колодце).

Широко известны разъемные соединения типа SC и ST для многомодовых и одномодовых волокон, однако в последнее время появились миниатюрные оптические разъемы VF фирмы ЗМ и LC фирмы Lucent (США), вносимые потери которых не более 0,1 дБ, и при терминировании оптических кабелей требуется гораздо меньшее пространство, монтировать их проще и стоимость дешевле.

Быстрое развитие Интернета и множества его приложений стало причиной не только возникновения новых сегментов экономики, но и взрывного роста трафика на телекоммуникационных сетях, что настоятельно требует соответствующего увеличения пропускной способности последних (гига- и терабиты для крупных ЭВМ).

Первым оператором, начавшим массовое развертывание линий связи на базе DWDM, была компания Sprint (США): в 1993 г. она приняла концепцию более интенсивного использования ВОЛС.

Возможна безрегенерационная передача на расстояние до 2500 миль [11] 10 Гбит/с потоков и даже до 2,4 Тбит/с при интеграции технологий SDH и DWDM с применением общей системы управления способны работать с гигабитовыми и терабитовыми скоростями.

Одновременно некоторые поставщики услуг прокладывают ВОК, содержащий более 100 ВС. Ожидается, что IP-маршрутизаторы потребуют терабитовых скоростей.

В современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) поток фотонов канализируется в пассивной части системы — в оптическом кабеле. Формирование же оптических импульсов, их усиление, коммутация, регенерация потоков информации и т.д. осуществляются с помощью электронных устройств. Вместе с тем следует ожидать, что очень скоро станет актуальной проблема передачи информации со скоростями десятки и сотни гигабит в секунду. Вполне очевидным является тот факт, что и при более низких скоростях (начиная с 5 Гбит/с) чисто электронные устройства работают неэффективно или даже не работают совсем. Поэтому на повестке дня стоит задача создания таких линий передачи, в которых все указанные выше операции происходили бы на фотонном уровне. Им было дано название «фотонные сети».

Для создания фотонных сетей, кроме оптического волокна, а также лазеров и фотоприёмников, необходим ряд устройств, работающих на чисто оптических принципах. К ним относятся генератор оптических импульсов, оптические усилители, оптические коммутаторы. При этом следует учесть, что их формирование должно происходить из оптического непрерывного излучения лазера.

Оптические усилители светового потока могут быть трех типов: усилитель мощности на передающей стороне, промежуточный линейный усилитель и предварительный усилитель, включаемый на приемной стороне линии.

В фотонных ВОЛС не обойтись без оптических коммутаторов световых потоков, управляемых также с помощью светового потока, оптических процессоров, оптических накопителей и ячеек памяти, оптических фильтров, вентилях (в литературе получивших название оптических изоляторов), оптических мультиплексоров, оптических ответвителей и разветвителей, модуляторов, фазосдвигающих элементов, поляризаторов. Все перечисленные устройства и элементы либо уже выпускаются, либо изготовлены их лабораторные образцы.

Наиболее подготовлены к серийному производству оптические фильтры, мультиплексоры, ответвители и разветвители, изоляторы (вентили), а также усилители. Они уже нашли применение в системах связи, а также в метрологических приборах для ВОЛС.

Оптические фильтры предназначены для пропускания той или иной части оптических электромагнитных волн, в частности, в системах ВОЛС инфракрасного диапазона 0,82...1,6 мкм. В настоящее время получили применение оптические фильтры двух типов.

Первый тип – фильтры на основе многослойного диэлектрика. В подобной структуре относительно легко выбрать волновую зону прозрачности и ширину этой зоны (т.е. полосы пропускания). Толщину слоев и их количество выбирают с учетом условий интерференции проходящего излучения, причем так, чтобы в полосе прозрачности проходило совпадение фаз оптических волн, вне же полосы фазы должны быть противоположными, вследствие чего происходит гашение излучения. Конструктивно фильтры представляют собой многослойную структуру, зажатую с обеих сторон двумя стержневыми линзами. Это могут быть градиентные оптические волокна. Часто такие слои наносятся прямо на торцы оптических волокон. Многослойные фильтры называют интерференционными. Они имеют следующие параметры: полоса пропускания 30...100 нм; прямые потери 0,5...1 дБ; переходные затухания до 40 дБ.

Более совершенны, но и более дороги фильтры на основе дифракционных решеток. В них используется спектральная зависимость угла дифракции оптического излучения, проходящего через дифракционную решетку. При этом они могут быть как отражательными, так и проходными. Дифракционная решетка представляет собой тонкую пластинку с нанесенными на ней параллельными штрихами. Расстояние между штрихами выбирается равным длине волны или меньше. Чаще всего решетки имеют от 600 до 2400 штрихов на 1 мм. Такие фильтры имеют следующие параметры: полосу пропускания менее 10 нм, прямые потери 1...2 дБ; подавление сигнала за пределами полосы пропускания порядка 40...50 дБ.

Оптические мультиплексоры (демультиплексоры) предназначены для объединения в один поток пространственно разделенных оптических потоков на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; демультиплексоры решают обратную задачу. Мультиплексоры в ВОЛС применяются для ввода в одно оптическое волокно двух и более оптических сигналов на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, а демультиплексоры – для пространственного разнесения спектрально разделенных оптических сигналов, распространяющихся в волокне. В частности, в ВОЛС эти оптические элементы применяются при спектральном уплотнении нескольких потоков информации.

По своему принципу работы мультиплексоры могут быть основаны на применении интерференционных фильтров и на использовании дифракционных решеток.

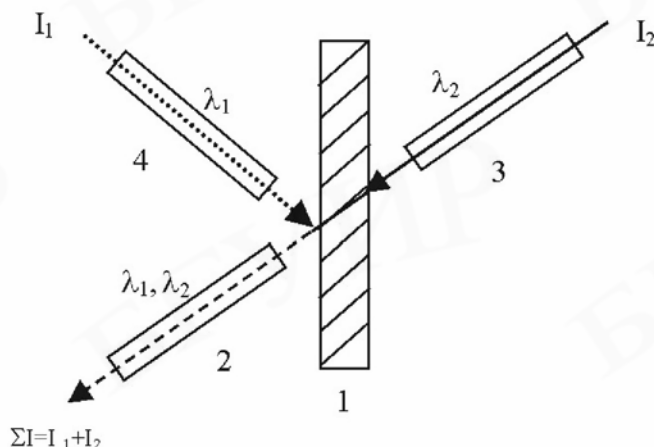


Рис. 9

Схема интерференционного мультиплексора представлена на рис. 9. Здесь 1 – интерференционный фильтр; 2 – общий канал; 3 и 4 – каналы для ввода волны λ_2 и λ_1 соответственно. Из схемы видно, что поток I_1 направляется на поверхность интерференционного фильтра под некоторым углом с одной стороны, а поток I_2 – с другой. Мультиплексоры интерференционного типа имеют примерно такие же параметры, как и сам интерференционный фильтр: прямые потери около 1 дБ, перекрестное затухание 25...30 дБ.

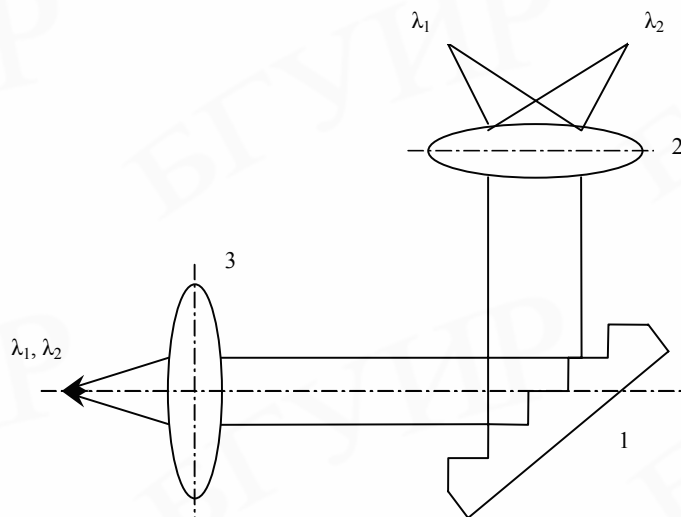


Рис. 10

Схема мультиплексора на основе дифракционных решеток представлена на рис. 10, где 1 – дифракционная решетка отражательного типа; 2 – коллиматор, создающий поток параллельных лучей; 3 – фокусирующий элемент, на выходе которого спектрально объединены потоки на длинах волн λ_1, λ_2 . Устройства этого типа нашли широкое применение в ВОЛС, поскольку они обладают наилучшими параметрами: большим числом объединяемых (или разделяемых) оптических потоков на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; малыми пря-

мыми потерями – 1...3 дБ; большим переходным затуханием – до 50 дБ; высокой спектральной разрешающей способностью – менее 10 нм.

Ответвители и разветвители предназначены для направления определенной части оптического излучения в нужные каналы, причем наиболее широкое распространение получили направленные ответвители X-типа, имеющие два входных и два выходных плеча, эти пары плеч внутри ответвителя развязаны. Ответвитель выполняет функции деления оптической мощности, поступающей на один из входных каналов, между выходными ее каналами (рис. 11, а). При обратном включении этот элемент работает как направленный ответвитель. Для систем с многомодовым волокном применяется ответвитель Y-типа (рис. 11, б).

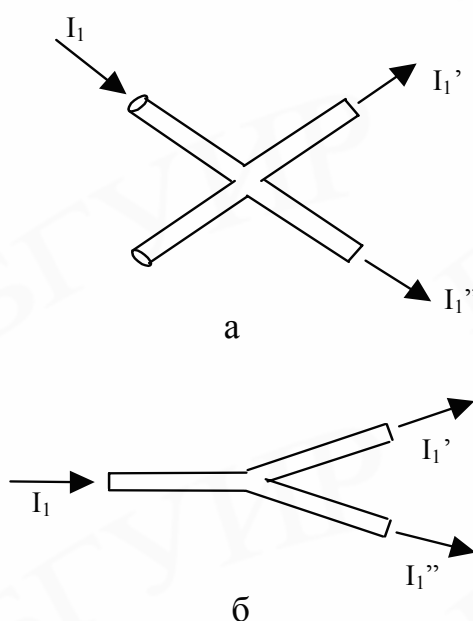


Рис. 11

В разветвителях происходит пространственное разделение оптической мощности входного излучения на равные её доли (как правило) между двумя, тремя и т.д. выходными каналами. При обратном направлении оптических потоков происходит их объединение. Если производится разъединение (или объединение) мощности двух оптических потоков, то разветвитель ничем не отличается от ответвителя Y-типа. В настоящее время ответвители и разветвители по своим параметрам достигли теоретического предела: вносимые потери – менее 0,005 дБ; переходное затухание – 60 дБ.

Оптические вентили (изоляторы) все шире используются для пропуска светового потока в прямом направлении и подавления в обратном.

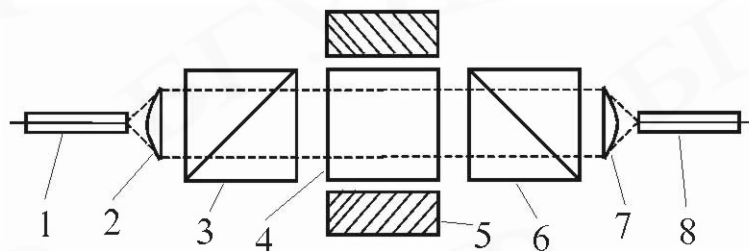


Рис. 12

Из волокна 1 (рис. 12) неполяризованное излучение направляется на коллимирующий элемент (коллиматор) 2. На выходе пучок излучения представляет собой неполяризованный поток параллельных лучей, которые, проходя через двоякопреломляющую призму 3 (например призму Рошона), раскладываются на два ортогонально поляризованных луча – обыкновенный и необыкновенный. Далее они поступают на элемент вращения плоскости поляризации луча (элемент Фарадея) 4 и под воздействием поперечного магнитного поля постоянного магнита 5 поворачивают плоскость поляризации на угол, равный 45° . Пройдя этот элемент, обыкновенный и необыкновенный лучи, плоскость поляризации которых повернута на 45° против часовой стрелки, поток направляется на вторую призму Рошона 6, ориентированную в соответствии с поляризацией упомянутых лучей. С выхода призмы 6 объединенные лучи поступают на коллиматор 7, в элементе 6 плоскость поляризации лучей поворачивается еще на 45° против часовой стрелки. В результате оба луча при падении на призму 3 оказываются поляризованными на 90° по отношению к прямому направлению. Поэтому на выходе призмы 3 оба луча сойдутся в точке смещенной оптической оси, вследствие чего излучение на выходе элемента 8 окажется смещенным относительно торца волокна 1 и поэтому не попадает в волокно. Современные оптические вентили имеют следующие параметры: потери в прямом направлении – $0,5 \dots 0,7$ дБ; развязка обратного излучения – 40 дБ.

Разработка методов управления параметрами световых потоков непосредственно с помощью оптического излучения позволила реализовать новый класс приборов, предназначенных для полностью оптической обработки сигналов. Среди различных механизмов управления световыми потоками наилучшие результаты достигнуты в приборах, действие которых основано на принципе оптической бистабильности. Наиболее подходящим материалом для разработки упомянутых элементов является полупроводниковый кристалл с использованием структур с набором квантовых ям, в котором оптическая бистабильность проявляется при комнатной температуре. Этот кристалл помещается в оптический резонатор Фабри–Перо. В настоящее время исследованы два класса приборов на указанном выше эффекте. К первому относятся устройства, в которых оптическое излучение распространяется перпендикулярно слоям структуры. В данном случае механизм оптической обратной

связи может создаваться как за счет периодической структуры без использования резонатора Фабри–Перо, так и с помощью этого резонатора.

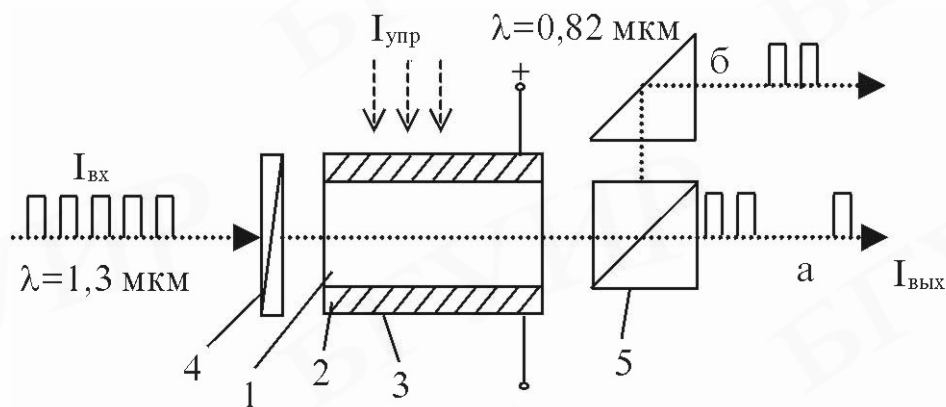


Рис. 13

Для примера на рис. 13 представлена схема поляризационного оптического светоуправляемого коммутатора оптических сигналов. Переключатель выполнен содержащим туннельно прозрачные слои 2 и токопроводящие покрытия 3. К структуре прикладывается постоянное электрическое напряжение в запирающем р-п-переход направлении. При этом всё электрическое поле концентрируется в узкой области р-п-перехода. После поляризатора 4 коммутируемый световой поток проходит через область сильного поля в р-п-переходе, где его плоскость поляризации поворачивается на 90° , и после отклоняющего элемента 5 (двойкопреломляющая призма) прошедший свет попадает в канал неотклоненного луча (а). Импульс управляющего света, поглощаемый в полупроводнике, воздействует на структуру со стороны электрода, прилегающего к р-п-переходу, вызывает переброс электрического поля в область базы кристалла. Соответственно на выходе коммутатора световой поток попадает в канал (б) отклоненного луча. На данной схеме длина волны коммутируемого луча равна 1,3 мкм, а управляющего – 0,82 мкм.

В настоящее время разработаны коммутаторы, в которых как коммутируемое, так и управляющее излучения имеют одинаковую длину волны. Управляемая мощность в современных светоуправляемых коммутаторах достигла практически энергетического предела 10^{-16} Дж, а быстродействие $5 \cdot 10^{-14}$ с.

В системах DWDM оптические несущие отстоят друг от друга на 50 ГГц.

Bell Labs осуществила эксперимент в технологии Ultra-Dense WDM, основанный на применении одного высокоскоростного лазера и величины между соседними несущими 10 ГГц. Разработан полностью оптический коммутатор по технологии микроэлектромеханических систем MEMS (Micro-Electromechanical System), где разделение световых пучков осуществляется с помощью микроскопических зеркал без преобразования в электронную форму.

Уровень разработок основных элементов фотонных сетей связи позволяет с определенным оптимизмом утверждать, что мы находимся на пороге создания сверхвысокоскоростных фотонных средств передачи информации. С развитием оптических технологий роль сетей SDH будет, видимо, снижаться, на уровне приложений будут применяться протоколы ATM и IP поверх DWDM. Используя «интеллектуальные» оптические маршрутизаторы (оптические коммутаторы длин волн), можно будет в считанные секунды выделить требуемую пропускную способность при обеспечении коэффициента использования сети $\approx 180\%$ (обычно это только $\approx 50\%$). «Интеллектуальные» оптические коммутаторы получили свое название потому, что благодаря очень «быстрым» заказным микросхемам, они могут определить топологию сети, составленной из подобных себе устройств, обнаруживать отказы оптических каналов и автоматически направлять трафик в обход последних. Они в считанные секунды выделяют пропускную способность по требованию. С другой стороны, оптико-электронное преобразование является узким местом, препятствуя увеличению пропускной способности сети. Последние технологические достижения в области плотного волнового мультиплексирования (DWDM) позволили приблизиться к решению этой проблемы. Так, используя фотонную транспортную сеть (полностью оптическую без электронной обработки и электронной маршрутизации) и технологию DWDM с оптическими коммутаторами длин волн (маршрутизаторами), пропускную способность сетей телекоммуникаций можно увеличить до нескольких терабит в секунду, обеспечивая высококачественную, надежную и дешевую мультимедийную связь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические достижения в области спектрального (волнового) разделения каналов позволили вплотную приблизиться к решению проблем повышения экономической эффективности волоконно-оптических линий связи. Крупные телекоммуникационные компании мира ведут разработки фотонных транспортных сетей, включая системы управления и эксплуатации уровня сетевых элементов и оптического сетевого уровня, используя концепцию TMN (Telecommunications Management Network).

Современный прогресс в развитии фотонных (полностью оптических) систем и сетей с использованием плотного (DWDM) и высокоплотного (HDWDM) мультиплексирования поистине невероятен: уже в ближайшие годы возможна практическая реализация ВОЛС на скорости передачи информации в десятки терабит в секунду. Учебное пособие позволит студентам ознакомиться с новейшими информационными технологиями, а также с принципами функционирования фотонных сетей телекоммуникаций, как в целом, так и их компонентов.

Литература

1. Харкевич А.А. Очерки общей теории связи. М.: Наука, 1965.
2. Барсков А.Г. VoIP в России. Как корабль назовете // Сети и системы связи. 2001. № 1. С. 80–83.
3. Попов С.А. Будущее транспортных сетей // Вестник связи РФ. 2002. № 2. С. 12–16.
4. Саутенков В.А., Свинцов А.Г. Лазеры для ВОЛС со спектральным уплотнением // Электросвязь. 2002. № 2. С. 45–46.
5. Шмалько А.В. Системы спектрального уплотнения оптических каналов // Вестник связи РФ. 2002. № 4. С. 162–169.
6. Заркевич Е.А., Павлов Н.М., Скляр О.К., Устинов С.А. Параметры системы связи со спектральным уплотнением и оптическими усилителями в документах МСЭ-Т // Электросвязь. 2000. № 6. С. 12–14.
7. Барсков А.Г. DWDM как зеркало оптической революции // Сети и системы связи. 2001. № 3. С. 66–71.
8. Рекомендация G. 692 МСЭ-Т. Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями. 1997.
9. Удовиченко В.Н., Шумаев В.В. Применение полупроводниковых усилителей в линейных трактах ВОСП // Электросвязь. 1996. № 3. С. 15–18.
10. Крейнин Р.Б., Цым А.Ю. Спектральное уплотнение оптических кабелей на транспортной сети ОАО «РОСТЕЛЕКОМ» // Электросвязь. 2000. № 8. С. 12–16.
11. Заркевич Е.А., Устинов С.А., Скляр О.К. Новые фотонные технологии для развития широкополосных коммуникационных сетей // Электросвязь. 2002. № 7. С. 25–28.
12. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 1998.
13. Слепов Н.Н. Оптические усилители // Мир связи. 1999. Ч. 1. № 8. Ч. 2. № 11.
14. Слепов Н.Н. Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны // Сети. 1999. № 4.
15. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: Syrus Systems. 1999.
16. Айноу Т. Вездесущий пластик // Сети и системы связи. 2001. № 1. С. 42–45.

Учебное издание

**Алишев Япанче Вагизович,
Урядов Владимир Николаевич**

ФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Учебное пособие
по дисциплине
«Волоконно-оптические системы передачи»
для студентов специальности
«Многоканальные системы телекоммуникаций»
и «Радиосвязь, радиовещание и телевидение»

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка Т.В. Шестакова

Подписано в печать 04.06.2003.
Печать ризографическая.
Уч.-изд. л. 2,0.

Формат 60x84 1/16.
Гарнитура «Таймс».
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 2,44.
Заказ 152.

Издание и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002.
Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.
220013, Минск, П. Бровки, 6.