

РУКОВОДСТВО **WDM**



Guide to WDM Technology and Testing

André Girard

| | |
|-------------------|------------------|
| Ghislain Lévesque | Peter Clark |
| Gregory W. Schinn | Olivier Plomteux |
| Don Galbraith | Juan Pablo Perez |
| Michael Carlson | Stéphane Chabot |
| Normand Cyr | Stéphane Duquet |
| Daniel Gariepy | Nicholas Gagnon |
| Stéphane Vigot | André Fougères |
| Étienne Gagnon | Alain Chandonnet |

ОГЛАВЛЕНИЕ

УДК 621.396.2

681.327.8

ББК 32.81

32.889

Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. / Пер. с англ. под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева, А.В. Шмалько. / Общая редакция А.В. Шмалько

Книга является хорошим введением в технологию и тестирование систем WDM для тех, кто знаком только с отдельными аспектами технологии и тестирования систем WDM и хотел бы пополнить и систематизировать свои знания в этой области. Она предназначена в первую очередь для инженеров, технических специалистов и научных работников в области телекоммуникационных технологий, которые хотели бы больше узнать о прикладных аспектах технологий WDM (Wavelength Division Multiplexing) и DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

Книга может быть полезной как для производителей систем и компонентов WDM, так и системных интеграторов, занимающихся разработкой современных сетей связи, инсталляцией аппаратуры WDM, провайдеров услуг связи, операторов корпоративных сетей, а также для аспирантов и студентов соответствующих специальностей вузов.

© Перевод EXFO, 2001

Перевод с англ. А.В. Леонова, И.И. Петренко

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-------------|
| ОГЛАВЛЕНИЕ | IV |
| ПРЕДИСЛОВИЕ | VIII |
| ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА КНИГИ | X |
| ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ | 1 |
| 1.1 РОСТ ПОТРЕБНОСТЕЙ В ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ | 2 |
| 1.2 ВОЛНОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ WDM | 3 |
| 1.3 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ DWDM..... | 4 |
| 1.4 БУДУЩЕЕ WDM | 5 |
| 1.5 НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ – НОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ | 6 |
| 1.6 ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА | 6 |
| ОСНОВЫ | 9 |
| 2.1 ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ..... | 10 |
| 2.2 ВРЕМЕННОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ..... | 10 |
| 2.3 ВОЛНОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ WDM | 14 |
| 2.4 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ DWDM..... | 15 |
| 2.5 КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ DWDM..... | 16 |
| 2.5.1 Передатчики..... | 16 |
| 2.5.2 Фотоприемники | 20 |
| 2.5.3 Аттенюаторы | 21 |
| 2.5.4 Коммутаторы | 22 |
| 2.5.5 Устройства оптической кросс-коммутации ОХС | 22 |
| 2.5.6 Волновые разветвители | 23 |
| 2.5.7 Устройства компенсации дисперсии..... | 24 |
| 2.5.8 Мультиплексоры и демультиплексоры..... | 25 |
| 2.5.9 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов | 31 |
| 2.5.10 Оптические усилители..... | 32 |
| 2.5.11 Оптическое волокно..... | 40 |
| 2.6 СРАВНЕНИЕ WDM И TDM | 42 |
| 2.6.1 Гибкость структуры линий связи | 42 |
| 2.6.2 Скорость передачи | 43 |
| ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM | 45 |
| 3.1 ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ | 46 |
| 3.2 МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ И ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ..... | 47 |
| 3.2.1 Полоса пропускания канала | 48 |
| 3.2.2 Поляризационные явления | 53 |
| 3.2.3 Вносимые потери | 55 |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| 3.2.4 Направленность | 57 |
| 3.2.5 Потери на отражение | 58 |
| 3.3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО | 58 |
| 3.3.1 Хроматическая дисперсия | 58 |
| 3.3.2 Поляризационная модовая дисперсия | 61 |
| 3.3.3 Поляризационная модовая дисперсия второго порядка | 65 |
| 3.3.4 Нелинейности | 66 |
| 3.4 ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ | 72 |
| 3.4.1 Усиленное спонтанное излучение | 74 |
| 3.4.2 Шум-фактор | 76 |
| 3.4.3 Шумы многолучевой интерференции | 78 |
| 3.5 ПЕРЕДАТЧИКИ | 78 |
| 3.5.1 Оптические передатчики | 80 |
| 3.5.2 Модуляторы передатчика | 81 |
| 3.5.3 Стабилизаторы длины волны | 81 |
| 3.6 ПРИЕМНИКИ | 81 |
| 3.7 КОМПЕНСАТОРЫ ДИСПЕРСИИ | 82 |
| 3.8 ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ | 83 |
| 3.9 АТТЕНЮАТОРЫ | 83 |
| 3.10 ИЗОЛЯТОРЫ | 84 |
| ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК | 85 |
| 4.1 ОБЗОР | 86 |
| 4.2 ОПТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ | 87 |
| 4.3 ПРИЕМНИКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ | 88 |
| 4.3.1 Измерители мощности излучения | 88 |
| 4.3.2 Анализаторы оптического спектра | 88 |
| 4.3.3 Измерители длины волны | 91 |
| 4.4 ТИПОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ | 92 |
| 4.4.1 Мультиплексоры/демультиплексоры | 92 |
| 4.4.2 Переключатели | 100 |
| 4.4.3 Оптические источники | 101 |
| 4.4.4 Приемники | 102 |
| 4.4.5 Усилители EDFA | 102 |
| 4.4.6 Брэгговские решетки | 110 |
| 4.4.7 Изоляторы | 111 |
| 4.4.8 Волокно | 112 |
| 4.5 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ | 119 |
| 4.6 КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ | 121 |
| 4.7 ТЕСТИРОВАНИЕ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ | 123 |
| 4.7.1 Измеритель оптических потерь | 123 |
| 4.7.2 Рефлектометр | 123 |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| 4.7.3 Измеритель потерь на отражение | 124 |
| 4.7.4 Установка для измерения PMD | 125 |
| МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM..... | 127 |
| 5.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM | 128 |
| 5.1.1 Коэффициент ошибок | 129 |
| 5.1.2 Измерение потерь | 131 |
| 5.1.3 Потери на отражение | 131 |
| 5.1.4 Отношение сигнал/шум | 132 |
| 5.1.5 Коэффициент усиления | 134 |
| 5.1.6 Центральная длина волны канала | 135 |
| 5.1.7 Дрейф длины волны и мощности сигнала | 136 |
| 5.1.8 Перекрестные помехи | 136 |
| 5.1.9 Нелинейные эффекты | 137 |
| 5.1.10 Четырехволновое смещение | 137 |
| 5.1.11 Поляризационная модовая дисперсия | 138 |
| 5.1.12 Хроматическая дисперсия | 139 |
| 5.1.12 Другие параметры систем WDM | 139 |
| 5.2. МОНТАЖ И НАЛАДКА СИСТЕМ WDM..... | 140 |
| 5.2.1 Тесты на сетевую совместимость | 140 |
| 5.2.2 Тесты при пуско-наладочных работах и вводе в эксплуатацию | 141 |
| 5.2.3 Тесты при техническом обслуживании и мониторинге | 142 |
| 5.2.4 Тесты на совместимость с оборудованием других производителей | 142 |
| 5.2.5 Тесты на целостность внутренних соединений сети | 142 |
| 5.3 ВВОД СИСТЕМ WDM В ЭКСПЛУАТАЦИЮ | 143 |
| 5.3.1 Передатчики | 143 |
| 5.3.2 Приемники | 144 |
| 5.3.3 Оптические усилители | 145 |
| 5.3.4 Мультиплексоры и демультиплексоры | 146 |
| 5.3.5 Тестирование системы в целом | 149 |
| 5.3.6 Обработка сообщений о неисправностях | 151 |
| 5.4 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM | 152 |
| 5.4.1 Отношение сигнал/шум OSNR | 153 |
| 5.4.2 Потери | 153 |
| 5.4.3 Поляризационная модовая дисперсия | 154 |
| 5.4.4 Хроматическая дисперсия | 154 |
| 5.4.5 Оптическое усиление | 154 |
| 5.4.6 Длина волны | 154 |
| 5.4.7 Перекрестные помехи | 155 |
| 5.5 МОНИТОРИНГ СИСТЕМЫ WDM | 155 |
| 5.5.1 Контрольный оптический канал | 155 |
| 5.5.2 Система дистанционного тестирования волокон RFTS | 156 |
| 5.5.3 Мониторинг и устранение неисправностей на практическом примере | 159 |
| НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM..... | 163 |
| 6.1 ЗАЧЕМ НУЖНЫ СТАНДАРТЫ?..... | 164 |
| 6.2 КАК УСТАНАВЛИВАЮТСЯ СТАНДАРТЫ? | 164 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

| | |
|--|------------|
| 6.3 ОРГАНИЗАЦИИ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM | 165 |
| 6.3.1 Международный телекоммуникационный союз ИТУ | 165 |
| 6.3.2 Международная электротехническая комиссия ИЕС | 168 |
| 6.3.3 Ассоциация телекоммуникационной промышленности ТИА | 169 |
| 6.4 НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ | 174 |
| СЕТИ ГОРОДСКОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБОВ | 175 |
| 7.1 НОВАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ DWDM | 176 |
| 7.2 ТЕХНОЛОГИЯ DWDM В ГОРОДСКИХ СЕТЯХ | 177 |
| 7.3 БОЛЬШЕ, ЧЕМ ПРОСТО УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ | 179 |
| 7.4 ВЛИЯНИЕ НА ВОПРОСЫ ТЕСТИРОВАНИЯ..... | 180 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ..... | 181 |
| 8.1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ..... | 182 |
| 8.2 ВОЛОКНО..... | 183 |
| 8.3 КОМПОНЕНТЫ | 183 |
| 8.4 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ | 184 |
| РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM | 187 |
| 9.1 КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИНИИ СВЯЗИ..... | 189 |
| 9.2 ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ: МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ | 194 |
| 9.3 ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ | 202 |
| 9.4 МОНИТОРИНГ | 207 |
| 9.4.1 Общий обзор..... | 207 |
| 9.4.2 Подключение и работа системы | 209 |
| 9.5 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ..... | 214 |
| ГЛОССАРИЙ..... | 2 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ | 24 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 31 |
| СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 37 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие новой технологии, начиная от создания ее теории и лабораторных экспериментов и заканчивая разработкой аппаратуры и практическим ее внедрением, всегда требует времени и больших затрат сил. Сложнее всего приходится первым, кто начинает применять новые методы и оборудование на практике.

Технология волнового мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing) не является исключением. В настоящее время промышленное производство волоконной оптики и средств телекоммуникаций находится в середине пути своего развития и стремительно совершенствуется. С развитием и распространением технологии WDM возрастают потребности специалистов и компаний в прикладной и в то же время основополагающей информации о системах WDM и методах их тестирования.

Компания EXFO предлагает руководство "Технологии тестирования систем WDM". Эта книга предназначена в первую очередь для инженеров, технических специалистов и научных работников в области телекоммуникационных технологий, которые хотели бы больше узнать о прикладных аспектах технологий WDM и DWDM (Dense WDM). Полезную для себя информацию здесь найдут производители систем и компонентов WDM, компании, занимающиеся инсталляцией аппаратуры WDM, провайдеры услуг связи и операторы корпоративных сетей. Книга может быть хорошим введением в технологию и тестирование систем WDM для тех, кто знаком только с отдельными аспектами тестирования систем WDM и хотел бы пополнить и систематизировать свои знания в этой области.

Глава 1 является введением в технологию WDM. В ней рассматриваются основы технологии WDM, ее применения и формулируются основные задачи по разработке систем WDM в настоящее время.

Главы 2-5 посвящены рассмотрению требований к системам WDM и основам тестирования таких систем:

- в главе 2-й даны основные понятия и рассмотрена концепция новой области;
- в главе 3-й представлены наиболее важные параметры компонентов систем WDM;
- глава 4-я посвящена некоторым специальным вопросам тестирования и сертификации компонентов систем WDM и оптического волокна;
- в главе 5-й рассмотрены инсталляция, техническое обслуживание и мониторинг систем WDM.

Глава 6 посвящена стандартизации систем WDM. Следует отметить, что многие стандарты в технологии WDM находятся еще в стадии разработки. Однако для специалистов представляют интерес некоторые детали и особенности принятых стандартов, которые рассмотрены в этой главе.

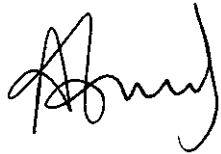
Технология WDM, которая изначально предназначалась для применения на магистральных линиях связи, начинает становиться важным компонентом в сетях регионального и городского масштаба MAN (Metropolitan Access Network). Эта тема заслуживает отдельного рассмотрения и является предметом 7-й главы.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Глава 8 посвящена новым возможностям систем WDM с учетом перспектив развития технологии WDM и тестирования таких систем.

В 9-й заключительной главе рассмотрены конкретные примеры применения технологии и систем WDM, а также их тестирования на существующих линиях связи.

Андре Жирар (Andre Girard), Ph. D, Senior Member of Technical Staff



ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА КНИГИ

В настоящее время системы связи стали одной из основ развития общества. Спрос на услуги связи, от обычной телефонной связи до широкополосного доступа в Интернет, постоянно растет. Это предъявляет новые требования к современным сетям связи, их пропускной способности, надежности, гибкости. Сейчас уже общепризнанно, что удовлетворить потребности человеческого общества в передаче информации можно только на основе волоконно-оптических систем связи.

Оптическое волокно обладает огромной пропускной способностью. Еще двадцать лет назад людям казалось, что вряд ли им когда-либо потребуется и сотая ее часть. Время показало, что потребности человечества растут гораздо быстрее, чем это можно предполагать. Двадцать лет назад волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) использовались в основном в качестве магистральных линий связи, соединяя в топологии "точка-точка" важнейшие города стран и континентов. Сегодня паутина волоконно-оптических сетей часто охватывает не только здания одного города, но и помещения одного здания. Современные многоуровневые, разветвленные оптические системы связи используют сложнейшее "интеллектуальное" оборудование и компоненты, требуют постоянного контроля и квалифицированного обслуживания.

Рост потребности в полосе пропускания носит "взрывной" характер, и предугадать его практически невозможно. Технологии ATM, IP, SDH (STM-16/64) уже в ближайшей перспективе могут не справиться с катастрофическим ростом объемов передаваемой информации. Это заставляет разработчиков систем связи искать такие решения, которые имеют значительный запас по пропускной способности и позволяют гибко увеличивать производительность сети.

Наиболее перспективной технологией, которая позволяет создавать гибкие разветвленные оптические сети с практически неограниченными возможностями роста полосы пропускания, является технология волнового мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть технологии WDM заключается в том, что по одному оптическому волокну одновременно передаются несколько информационных каналов на разных длинах волн, что позволяет максимально эффективно использовать возможности оптического волокна. Технология WDM позволяет многократно увеличить пропускную способность ВОЛС, не прокладывая новые кабели и не устанавливая на каждое волокно новое оборудование. Работать с несколькими каналами в одном волокне намного удобнее, чем с несколькими волокнами, так как для обработки любого числа каналов в волокне требуется лишь один мультиплексор WDM, один демультиплексор WDM и соответствующее расстоянию число оптических усилителей.

Первые системы WDM имели два канала в окнах 1330 и 1550 нм. Затем появились 4-канальные системы, с расстоянием между каналами 8-10 нм в окне 1550 нм. Последовавшая "гонка за лидерство" между разработчиками и производителями компонентов WDM привела к разработке технологии плотного волнового мультиплексирования DWDM (Dense WDM) и появлению систем с 8, 16, 32, 64 каналами. В настоящее время стандартным расстоянием между каналами считается 0,8 нм. Имеются коммерческие системы с 192 каналами.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА КНИГИ

Появившаяся в последние годы русскоязычная техническая литература¹ по новым технологиям для волоконно-оптических сетей связи, как правило, посвящена отдельным их направлениям [1-4]. Оптические волоконные световоды и кабели, а также различные аспекты их применения для ВОЛС рассматриваются в [1, 5-9]. Вопросы построения волоконно-оптических сетей и ВОЛС обсуждаются в [10-12]. Интерес к развитию элементной базы и построению полностью оптических сетей связи нашел свое отражение в изданиях [1, 4, 10, 13, 14]. Системам тестирования оптических линий связи посвящены работы [12, 15]. Интеграционные процессы в современных сетевых технологиях и телекоммуникационных сетях, вопросы планирования и построения цифровых сетей связи различного назначения обсуждаются в монографии [14]. Основной тенденцией развития, планирования и построения современных цифровых сетей связи становится интеграция цифровой первичной (или транспортной) и вторичных сетей в единую мультисервисную сеть на основе интеграции базовых сетевых технологий на единой аппаратной платформе.

В предлагаемой вниманию читателей книге рассмотрены базовые технологии построения оптических транспортных и магистральных сетей и методы тестирования таких сетей. Рассматриваются и анализируются основные параметры и характеристики компонентов и систем WDM/DWDM. Обсуждаются вопросы сетевых применений технологии WDM и интеграции базовых сетевых технологий в полностью оптических сетях. Даны рекомендации по выбору основных компонентов и их параметров для различных применений в современных сетях связи.

Предлагаемая книга является хорошим введением в технологию и тестирование систем WDM как для тех, кто только начинает знакомиться с отдельными аспектами технологии и тестирования систем WDM, так и для специалистов, которые хотели бы пополнить и систематизировать свои знания в этой области. Она предназначена в первую очередь для инженеров, технических специалистов и научных работников в области телекоммуникационных технологий, которые хотели бы больше узнать о прикладных аспектах технологий WDM и DWDM.

Компания EXFO – один из ведущих мировых разработчиков и производителей измерительного оборудования для тестирования и мониторинга ВОЛС. В настоящее время весь спектр продукции EXFO доступен на российском рынке, и издание на русском языке книги, написанной специалистами компании EXFO – несомненно, очень своевременный шаг. Эта книга станет хорошим руководством по работе с оборудованием EXFO и наверняка займет достойное место на столах отечественных специалистов в области построения и эксплуатации ВОЛС. Компания EXFO и коллектив редакторов перевода выражают благодарность сотрудникам компании ТЕЛЕКОМ ТРАНСПОРТ за помощь в подготовке русскоязычного издания этой книги.

А.В. Шмалько,
А.М. Бродниковский,
Р.Р. Убайдуллаев

¹ Список литературы, добавленной при переводе, приведен в конце книги (*прим.ред.*)

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА КНИГИ

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

1.1 РОСТ ПОТРЕБНОСТЕЙ В ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ

За последние десять лет многократно выросли потребности людей в обмене информацией. Во много раз увеличилась скорость сетей передачи данных и их географический охват. Быстрая и надежная передача видео, голоса и данных приобрела исключительную важность для развития многих сторон жизни современного человека, государственного управления, промышленности и общества в целом. Потребность в увеличении пропускной способности каналов связи наиболее остро ощущается в Северной Америке, Европе и Азии и постоянно растет во всем мире.

В конце 1990-х годов объемы передачи информации по международным сетям связи многократно возросли за счет такого феномена, как Интернет. Интернет долго ждал своего часа, обеспечивая передовые для своего времени услуги связи военным и научно-исследовательским организациям. Когда появилась всемирная сеть World Wide Web и широкая публика получила доступ к неисчерпаемым объемам информации в Интернете, его способность поглощать практически любую доступную полосу пропускания стала очевидной. Последовавший рост пропускной способности каналов связи намного превысил самые смелые прогнозы (рис. 1.1).

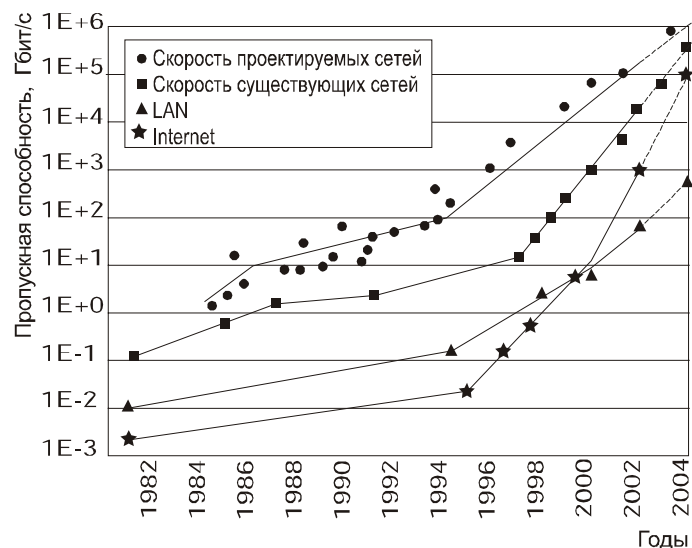


Рис. 1.1. Рост скорости передачи в сетях за последние десятилетия (видно, что период времени между разработкой новых технологий и их внедрением постоянно сокращается).

Оптическое волокно оказалось именно той средой передачи, которая смогла справиться с этими огромными потоками информации. В первое время для деления громадной полосы пропускания отдельного волокна на выделенные каналы связи применялось временное мультиплексирование TDM (Time Division Multiplexing). Однако рост сложности оборудования для модуляции и мультиплексирования при увеличении скоростей передачи данных ограничил применения этой технологии. Дальнейшее увеличение полосы пропускания смог обеспечить альтернативный подход – волновое мультиплексирование WDM (Wavelength Division Multiplexing).

1.2 ВОЛНОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ WDM

Системы WDM основаны на способности оптического волокна одновременно передавать свет различных длин волн (цветов) без взаимной интерференции. Каждая длина волны представляет отдельный оптический канал в волокне. Существуют различные оптические методы для того, чтобы объединить несколько каналов в одном волокне, а затем выделить их в нужных точках сети. На сегодняшний день технология WDM позволяет передавать по одному волокну каналы с разницей длин волн между соседними каналами всего в доли нанометра ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), что называется плотным волновым мультиплексированием DWDM (Dense WDM). Развитие технологии WDM позволило создать коммерческие сети, в которых по отдельным волокнам передается более сотни независимых оптических каналов, а также сети, в которых передача сигналов осуществляется в обоих направлениях в одном и том же оптическом волокне. И это – только начало.

Своими успехами технология DWDM во многом обязана достижениям в разработке усилителей на оптическом волокне, легированном эрбием EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). В этих устройствах за счет энергии лазера накачки происходит усиление всех поступающих на вход каналов, длины волн которых лежат в диапазоне 1530-1565 нм – рабочем диапазоне усилителя. В усилителе EDFA оптические сигналы усиливаются без преобразования в электрические и обратно, что дает возможность создавать сети передачи данных высокой протяженности при значительной экономии электронных компонентов или вообще без них.

В технологии TDM входные низкоскоростные каналы, приведенные к стандартным скоростям и синхронизированные друг с другом, объединяются (мультиплексируются) в один составной высокоскоростной канал передачи. Каждому низкоскоростному каналу выделяются периодически повторяющиеся временные интервалы (тайм-слоты). Для того, чтобы увеличить пропускную способность линии связи (передать большее количество низкоскоростных каналов), нужно увеличить битовую скорость составного канала, что приводит к удорожанию оборудования и усложнению протоколов передачи. Кроме того, для восстановления (демультиплексирования) первичных низкоскоростных каналов на стороне приемника необходимо более тщательно обеспечивать защиту и идентификацию каждого тайм-слота.

В отличие от этого, технология WDM позволяет увеличить пропускную способность линии связи, не меняя существующее электронное оборудование. Новые каналы добавляются в линию связи на новых длинах волн, никак не затрагивая уже существующие каналы. Каналы могут иметь различные протоколы и скорости передачи и, их не требуется синхронизировать между собой. Более того, к каждому каналу системы WDM может быть применена технология TDM, что дает еще большую гибкость в распределении полосы пропускания канала между отдельными пользователями.

Первые устройства WDM позволяли передавать по одному волокну от 4 до 16 каналов, каждый из которых поддерживал передачу сигналов синхронной цифровой иерархии SDH/SONET со скоростью 2,5 Гбит/с. Сегодня производители оборудования DWDM разрабатывают системы емкостью в несколько десятков каналов. Имеются опытные системы, которые позволяют передавать по одному оптическому волокну сотни каналов и по суммарной скорости передачи приближаются к 1 Тбит/с. Системы с такой пропускной способностью представляют исключительный интерес для операторов

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

связи. На рис. 1.2 показаны возможности увеличения пропускной способности сети за счет применения технологии WDM.

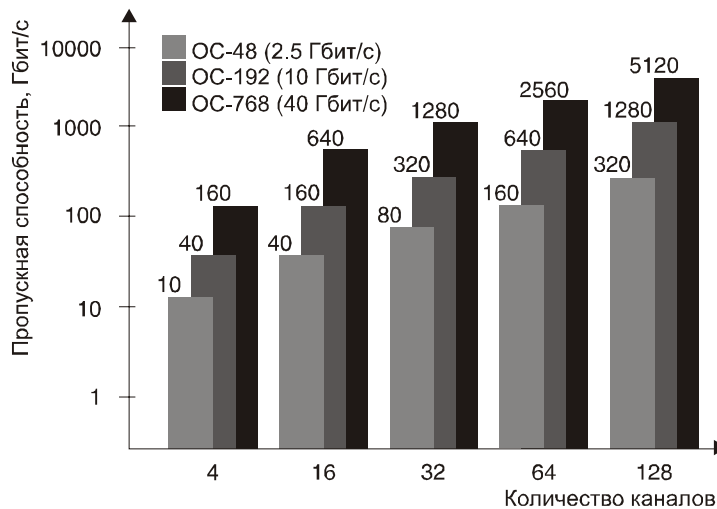


Рис. 1.2. Стремительный рост пропускной способности линии связи с увеличением числа каналов.

1.3 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ DWDM

Системы DWDM начали применяться с 1996 года главным образом на линиях связи большой протяженности, где в первую очередь требовалось увеличение пропускной способности. Добавление каналов с помощью технологии DWDM не требует замены существующего волокна и является естественным этапом развития сети. Так как потребность абонентов в пропускной способности каналов связи постоянно растет, а характер передаваемой информации часто и непредсказуемо меняется, технология DWDM, по всей видимости, найдет широкое применение и в сетях других уровней.

В США независимые местные телекоммуникационные компании CLEC (Competitive Local Exchange Carrier) и некоторые операторы местных сетей передачи данных активно применяют системы DWDM для уменьшения нагрузки на наиболее активно используемые участки своих сетей, в частности, для увеличения полосы пропускания каналов связи между центральными АТС. Традиционные телефонные компании США ILEC (Incumbent Local Exchange Carrier) также начали внедрять системы DWDM. Однако из-за неповоротливости ILEC и большого количества установленного традиционного оборудования линии DWDM занимают пока лишь небольшую долю от общего числа линий связи ILEC.

В последнее время на рынке появляются системы DWDM, которые разработаны специально для городских и региональных сетей MAN (Metropolitan Area Networks). Такие сети (DWDM MAN) исключительно надежны и могут поддерживать кольцевую и ячеистую топологию сети на оптическом уровне. Переключение на резервные каналы и маршруты в случае необходимости происходит значительно быстрее, чем в сетях SDH/SONET, что расширяет возможности передачи потоков голоса, видео и данных. Возможно, это позволит отказаться от большей части оборудования, работающего в стандарте SDH/SONET. В настоящее время стало возможным предоставление абонентам в аренду отдельных длин волн в волокне.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Передача трафика IP непосредственно по сетям DWDM (IP поверх DWDM) позволяет значительно уменьшить стоимость передачи данных для конечного пользователя, так как отпадает необходимость использовать оборудование SDH/SONET.

Развитие технологии DWDM позволяет надеяться, что рано или поздно будут созданы и начнут использоваться на практике полностью оптические сети AON (All Optical Network), в которых оптические сигналы не будут преобразовываться в электрическую форму на промежуточных узлах. Из-за большого количества абонентов и огромных скоростей передачи данных в магистральных оптических сетях DWDM обеспечение их работоспособности становится исключительно важной задачей.

Многие производители оборудования поставляют компоненты, выполняющие разветвление, объединение и мультиплексирование оптических сигналов разных длин волн, передаваемых по оптическому волокну. Производятся оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов с заданной длиной волны OADM (Optical Add/Drop Multiplexer). В ближайшем будущем ожидается появление динамически перестраиваемых приборов. Разрабатываются и уже появляются на рынке устройства оптического кросс-коннекта ОХС (Optical Cross Connect,), которые выполняют те же функции, что и электронные устройства кросс-коннекта сетей SDH/SONET. В будущем, скорее всего, появятся полностью оптические коммутаторы и маршрутизаторы.

1.4 БУДУЩЕЕ WDM

Потребность в увеличении пропускной способности сетей связи удваивается каждый год, и этот темп вряд ли замедлится в ближайшие десять лет. Кроме того, эта потребность все шире распространяется географически. Снижение цен поставщиками, ослабление монопольных позиций государства в телекоммуникациях и неослабевающий интерес к использованию Интернета приводят только к увеличению спроса на скорость передачи. На сегодняшний день технология DWDM обеспечивает самый быстрый и экономичный рост полосы пропускания, на практике показывая свою надежность. Во многих случаях благодаря применению технологии DWDM пропускная способность оптической линии связи может быть увеличена в сотни раз.

По-видимому, технология DWDM еще не скоро достигнет своего предела по пропускной способности. Как было сказано выше, в опытных системах уже достигнута передача нескольких сотен каналов по одному оптическому волокну. Дальнейший рост числа каналов возможен за счет уменьшения спектрального расстояния между ними, использования усилителей EDFA с большей шириной спектра (например, включая L-диапазон – от 1565 до 1625 нм), или за счет применения специализированных волокон, позволяющих осуществлять передачу в диапазоне шириной до 1200 нм без дополнительного усиления.

Впечатляющий рост пропускной способности достигается при увеличении скорости передачи данных в каждом канале. В современных цифровых системах передачи эта скорость составляет 2,5 Гбит/с или 10 Гбит/с. Были продемонстрированы опытные образцы систем со скоростью передачи 40 Гбит/с на канал, причем уже возможна одно-временная передача данных по 192¹ каналам со скоростью 40 Гбит/с в каждом. Это

¹ Компания CIENA, с которой работает ТТ, уже поставляет системы с числом каналов 192

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

соответствует суммарной скорости передачи более 5 Тбит/с (около 1000 полных компакт-дисков в секунду) по одному волокну. Спрос на передачу по Интернету аудио и видео в реальном времени, несомненно, будет способствовать широкому применению систем DWDM и снижению их стоимости.

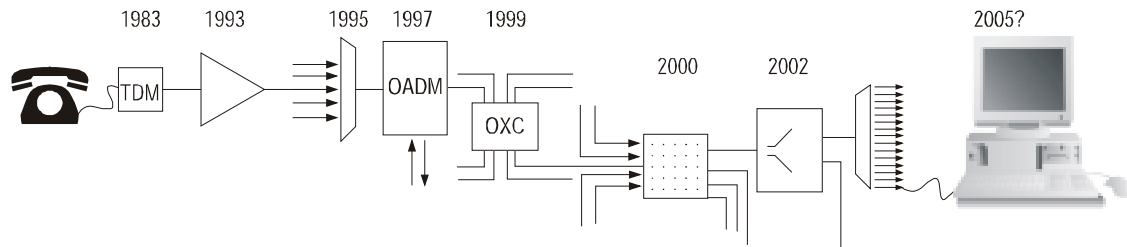


Рис. 1.3. Эволюция технологий связи в ближайшем будущем позволит довести оптическое волокно до каждого компьютера

1.5 НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ – НОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Казалось бы, провайдеры услуг Интернет и их абоненты могут вздохнуть свободно – производители оборудования готовы к увеличению спроса на пропускную способность сетей связи. Однако внедрение новой технологии на практике требует значительных затрат. Поддержание соответствующего уровня работоспособности систем DWDM является более сложной задачей по сравнению с волоконно-оптическими сетями первого поколения. Когда по волокну передается только один канал, состояние волокна контролируется с помощью осциллографа путем наблюдения сигналов на физическом уровне и оптического тестового оборудования, например, оптического рефлектометра OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) путем наблюдения характеристик волокна. Контроль состояния сетей TDM, когда несколько низкоскоростных каналов объединены в один составной высокоскоростной канал, требует более сложного измерительного оборудования и методик тестирования. Системы DWDM вносят в тестирование новое измерение – все параметры, влияющие на эффективность и целостность передачи, должны измеряться для каждого канала на каждой используемой длине волны. Это достаточно сложная задача, особенно при плотном расположении каналов по длине волны в волокне.

Необходимо периодически проверять и тестировать на всех длинах волн как отдельные элементы системы DWDM (активные и пассивные компоненты, подсистемы и оптическое волокно), так и всю систему в целом. Выбор измерительного оборудования осуществляется, исходя из сложности тестируемых компонентов, типа системы связи и решаемых задач и требует специальной подготовки обслуживающего персонала у оператора связи.

1.6 ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

Несколько в стороне от многократного роста пропускной способности сетей связи, технологического прогресса, появления новых сетевых приложений и магистралей передачи данных лежит другая серьезная проблема – нехватка человеческих ресурсов. Телекоммуникационная промышленность развивается столь стремительно, что университеты и технические институты не успевают подготовить достаточное количество технических специалистов. Все сложнее найти специалистов с достаточным опытом

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

работы. В то же время, планка технического образования опускается, так как это позволяет увеличить поток студентов. Тем не менее, одного взгляда на веб-сайты ведущих компаний достаточно, чтобы обнаружить большое количество вакансий в области волоконной оптики.

Рост и развитие оптических сетей происходит не только физически, но и географически. Их развертывание в городах, странах и на целых континентах порождает огромный спрос на специализированный обслуживающий персонал. Разработкой и производством компонентов, необходимых для построения оптических систем, занимаются команды конструкторов и специалистов. Научно-исследовательским отделам требуются высоко квалифицированные ученые, дистрибьюторам и партнерам по распространению – квалифицированные менеджеры. Высокий спрос на специалистов в области волоконно-оптических систем передачи наблюдается уже несколько лет и, по всей видимости, сохранится в ближайшие годы. Компаниям, которые имеют отношение к телекоммуникационной индустрии, следует принимать это во внимание и относиться к кадровому вопросу со всей серьезностью.

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 2

ОСНОВЫ

2.1 ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

С технологией WDM, как и с передачей данных по оптическому волокну в целом, связано множество разнообразных и часто малоизвестных физических явлений, практических и экономических ограничений. Глава 2 посвящена технологиям оптической связи и начинается с краткого введения в традиционные системы TDM и их эволюцию. После этого подробно рассматриваются системы WDM и их компоненты. Глава 2 завершается рассмотрением отличий между технологиями TDM и WDM и переходом к детальному рассмотрению важнейших параметров компонентов WDM в главе 3.

2.2 ВРЕМЕННОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Полоса пропускания оптического волокна значительно шире, чем требуется на практике любому отдельно взятому приложению. Необходимость максимально эффективно использовать возможности передачи информации по оптическому волокну послужила толчком для интенсивных исследований.

Первой стали применять технологию TDM, которая широко используется в обычных системах электросвязи. Эта технология предусматривает объединение нескольких входных низкоскоростных каналов в один составной высокоскоростной канал. Входные каналы по очереди модулируют высокочастотную несущую в течение выделенных им коротких промежутков времени (тайм-слотов), которые периодически повторяются. Например, в течение первого тайм-слота несущая модулируется первым входным каналом, в течение второго – вторым, в течение третьего – третьим, в течение четвертого – четвертым, в течение пятого – снова первым, в течение шестого – снова вторым и т. д. (рис. 2.1).

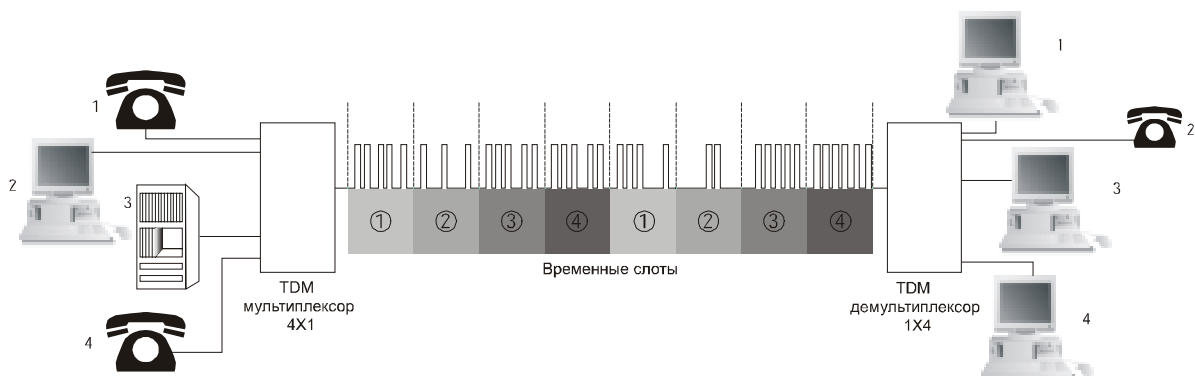


Рис. 2.1 В системах TDM все информационные каналы передаются по одному волокну на одной длине волны в течение соответствующих тайм-слотов

Мультиплексор на одной стороне канала связи собирает данные со всех источников и передает их по волокну в течение соответствующих тайм-слотов. Демультиплексор на другой стороне линии связи выделяет тайм-слоты, считывает данные и передает их соответствующим пользователям уже в виде единых выходных потоков.

Использование технологии TDM позволило увеличить пропускную способность волоконно-оптических линий связи до 10 Гбит/с. Линии со скоростью 10 Гбит/с будут постепенно заменять первоначально использовавшиеся системы TDM со скоростью

ОСНОВЫ

2,5 Гбит/с. Скорость передачи 10 Гбит/с в некотором роде разграничивает два типа систем TDM. 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 TDM 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. В табл. 2.1 приведены стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи иерархий SDH/SONET.

Таблица 2.1 Стандартные интерфейсы и соответствующие им скорости передачи.

| Оптический модуль SONET | Синхронный транспортный модуль SDH | Скорость передачи |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------|
| OC-3 | STM-1 | 155 (155,52) Мбит/с |
| OC-12 | STM-4 | 622 (622,08) Мбит/с |
| OC-48 | STM-16 | 2,5 (2,48832) Гбит/с |
| OC-192 | STM-64 | 10 (9,9533) Гбит/с |
| OC-768 | STM-256 | 40 (39,813) Гбит/с |

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. Применение методов, уменьшающих влияние хроматической дисперсии, ведет к увеличению потерь, стоимости и сложности системы. Для стандартного ступенчатого одномодового волокна (G.652 по классификации ИТУ) 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 FWM (Four-Wave Mixing), которое мы рассмотрим далее в главе 3. К сожалению, частота излучения лазеров с внутренней модуляцией может определенным образом меняться во времени. Это негативное явление называется чирпированием (Chirp), а модулированный сигнал, несущая которого меняется таким образом – чирпированным сигналом. Чирпирование 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 TDM требует разработки и внедрения исключительно сложных и дорогостоящих электронных компонентов. Вся стоимость их разработки ложится на плечи оптической промышленности, так как в других областях (например, компьютерные технологии) эти скорости еще не достигнуты. Точность синхронизации сигналов систем передачи, предъявляемые при модуляции тока лазеров, мультиплексировании и демультиплексировании электрических сигналов на сверхвысоких частотах, очень высоки.

Технология помехоустойчивого кодирования FEC (Forward Error Correction) может увеличить энергетический потенциал системы на несколько дБ. FEC давно используется в беспроводной и спутниковой связи. В этой технологии данные перед передачей кодируются с добавлением избыточных битов. Избыточность позволяет исправлять случайные ошибки в цифровом сигнале без повторной передачи. В технологии FEC обнаружение и исправление ошибок передачи битов выполняется аппаратурой, как правило, на физическом уровне. Однако помехоустойчивое кодирование не в состоянии исправить все ошибки передачи, которые возникают из-за различных причин (хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия, перекрестные помехи, и т.д.).

Поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion), также 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 SOP (State of Polarization) 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.

Несмотря на все трудности, скорость передачи в цифровых сетях связи постоянно растет. В 1999 году была достигнута скорость 40 Гбит/с (уровень STM-256). Несмотря на то, что коммерческое внедрение линий связи уровня STM-256 маловероятно до конца 2001 года, крупнейшие телекоммуникационные компании уже сообщили о проведении успешных лабораторных испытаний систем передачи со скоростью 40 Гбит/с на линиях связи протяженностью 100 км и более. Экспериментальные линии связи уровня STM-256 пока еще не в полном объеме поддерживают функции ввода и вывода каналов ADM (Add/Drop Multiplexing) и кросс-коммутации.

Ожидается скорое появление на рынке оборудования цифровых систем передачи SDH/SONET, обеспечивающих мультиплексирование потоков уровня STM-16 и STM-64 в высокоскоростные потоки уровня STM-256. По всей видимости, первые линии связи уровня STM-256 будут применяться в сетях городского и регионального масштаба. По мере увеличения дальности передачи и появления более совершенных методик компенсации различных негативных факторов линии связи уровня STM-256 будут находить все более широкое применение. Возможно, в некоторых случаях для увеличения дальности таких линий связи коммерчески более выгодно будет использовать регенерацию сигнала.

ОСНОВЫ

Одной из перспективных технологий сверхдальней связи считается солитонная передача данных. Солитон – это особый вид светового импульса, который при распространении в определенной среде, и в частности – оптическом волокне, сохраняет свою форму (преимущественно гауссову). При усилении солитона через равные расстояния, теоретически он может распространяться сколь угодно далеко. Это связано с тем, что показатель преломления среды, в которой распространяется солитон, имеет небольшую добавку, которая квадратично зависит от мощности сигнала. При малых мощностях сигнала этой добавкой можно пренебречь. Однако при распространении солитона, представляющего собой волновой пакет большой мощности, нелинейные явления и хроматическая дисперсия при определенных условиях могут компенсировать изменения формы солитона. При этом солитон обладает исключительной стабильностью параметров распространения и устойчивостью к внешним возмущениям. Несмотря на то, что дальность распространения солитонов ограничена затуханием сигнала в волокне, эта технология может успешно применяться для передачи сигналов большой мощности на большие расстояния. При солитонной передаче сигналов используют кодирование с возвратом к нулю (рис. 2.2).

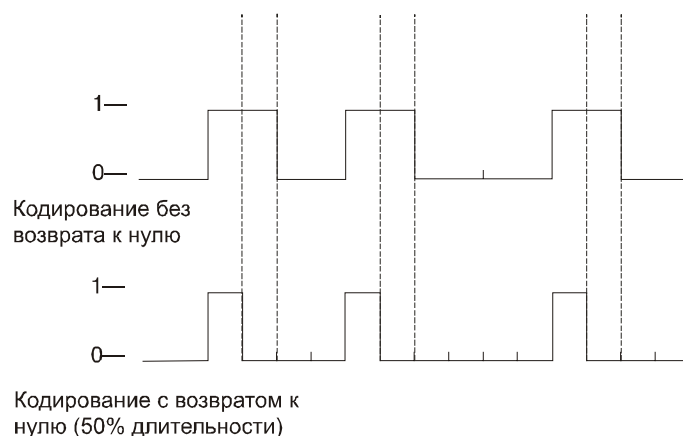


Рис. 2.2 Кодирование с возвратом к нулю

Независимо от того, станет ли технология TDM универсальным протоколом, таким как IP, или будет адаптирована в соответствии со стандартами SONET/SDH, в ближайшие годы ее будут использовать многие операторы. «Второе дыхание» технологии TDM обеспечили успехи в изучении солитонов. Какие бы проблемы не возникали в технологии TDM и какие бы пути их решения не использовались, ни одна существующая технология не может заменить ее в настоящее время. Однако технология WDM может использоваться параллельно с технологией TDM для повышения ее эффективности.

2.3 ВОЛНОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ WDM

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных TDM. Для повышения пропускной способности, вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии TDM, 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, то есть реализовать концепцию «виртуального волокна». По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения – кабельное телевидение, телефонию, трафик Интернет, “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 DWDM 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 TDM уровня STM-16.

Совместное применение технологий TDM и WDM позволяет значительно расширить спектр предоставляемых услуг, оставляя практически без изменений большую часть имеющегося оборудования. Применение технологии WDM дает многочисленные

ОСНОВЫ

преимущества, однако требует высокого уровня подготовки технического персонала и современного контрольно-измерительного оборудования.

2.4 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ DWDM

Система DWDM во многом похожа на традиционную систему TDM. Сигналы разных длин волн, генерируемые одним или несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором в многоканальный составной 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 устройств кросс-коммутации (рис. 2.3).

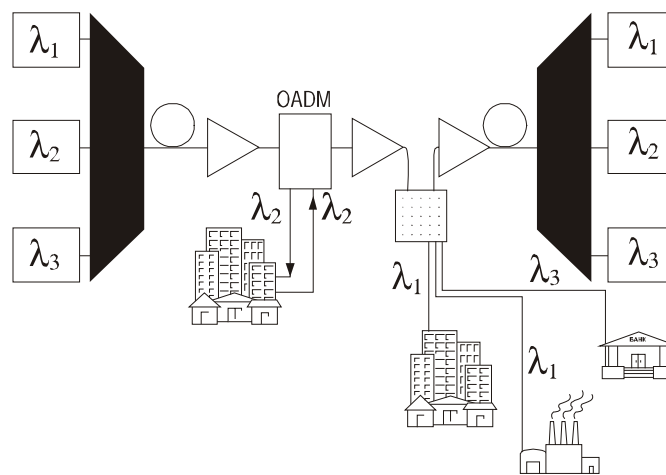


Рис. 2.3 Типовая система WDM с возможностями добавления/выделения и кросс-коммутации каналов

Главным отличием систем DWDM от систем TDM 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 TDM.

Система DWDM в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких усилителей EDFA, 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.

2.5 КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ DWDM

Основное требование к компонентам систем DWDM состоит в том, что они должны одинаково обрабатывать все каналы на всем протяжении оптического пути линии связи. Для этого требуется тщательный выбор оптических передатчиков, мультиплексоров, демультиплексоров, усилителей и волокна.

Все оптические характеристики пассивных и активных компонентов сети – вносимые потери, потери на отражение, дисперсия, поляризационные эффекты и т.д. должны измеряться как функция длины волны во всем диапазоне длин волн, используемом для передачи в системе DWDM. В системах DWDM часто используют значительно более сложные устройства, чем в системах с одной рабочей длиной волны, и проводить тестирование характеристик таких устройств намного сложнее. В мультиплексорах, демультиплексорах, узкополосных фильтрах систем DWDM используются тонкопленочные фильтры, сварные биконические разветвители BFT (Fused Biconic Tapered Coupler), решетки на основе массива волноводов AWG (Array Waveguide Grating), волоконные брэгговские и обычные дифракционные решетки. Необходимо исследовать влияние активных компонентов (в особенности, оптических усилителей) и взаимной интерференции каналов на целостность передаваемых сигналов для минимизации потенциальной возможности их неблагоприятного воздействия.

Несмотря на то, что все материалы и компоненты при производстве тестируются на соответствие стандартам, возможно ухудшение их характеристик при непосредственной установке в полевых условиях. При объединении отдельных компонентов в единую систему, небольшие различия их характеристик могут накапливаться и непредсказуемым образом влиять на параметры сети в целом. Для обеспечения гарантированной надежности сети, необходимо выполнять тестирование не только каждого компонента в отдельности, но и всей системы в целом.

Тестирование компонентов может вызвать много сложностей. Разница длин волн соседних каналов в системах DWDM очень мала, и параметры многих компонентов (например, мультиплексоров) должны строго соответствовать пределам допустимых отклонений. При большом числе каналов используемый спектральный диапазон становится достаточно широким, и поддержание близких значений параметров для всех каналов (коэффициента усиления, дисперсии, уровня вносимых шумов и т.д.) становится достаточно сложной задачей.

2.5.1 Передатчики

В первых волоконно-оптических передатчиках электрические и электронно-оптические элементы представляли собой отдельные модули. Современные 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 является по сути электронно-оптическим преобразователем, в котором интенсивность выходного светового сигнала модулируется входным цифровым электрическим сигналом. При низких скоростях передачи модулируется управляющий ток (лазеры с внутренней модуляцией), при высоких – сам оптический сигнал (лазеры с внешней модуляцией).

ОСНОВЫ

Передатчик для одного канала обычно представляет собой лазер с распределенной обратной связью DFB (Distributed Feed Back) с выходной мощностью в волокне не менее 0 дБм (1 мВт) и модулятор. При высоких частотах модуляции модулятор обычно внешний. Современная интегральная оптика позволяет создавать недорогие и удобные в эксплуатации оптические передающие модули, объединяющие в одном кристалле лазер, модулятор и полупроводниковый усилитель. Разработаны оптические передающие модули, объединяющие мультилазеры, одновременно генерирующие сигналы на нескольких длинах волн, мультиплексор и полупроводниковый оптический усилитель мощности.

Иногда за лазером устанавливают регулируемый аттенуатор, плавно уменьшающий мощность лазера. Степень ослабления сигнала лазера выбирается исходя из характеристик первого регенератора в линии связи. В случае, когда одновременно используют несколько передатчиков с разными длинами волн, для выравнивания спектрального распределения мощности также требуется применение соответствующих аттенуаторов.

В системах DWDM наиболее широко применяют DFB-лазеры с резонатором типа Фабри-Перо. При этом дифракционная решетка выполнена на поверхности активной части кристалла лазера, что обеспечивает точный выбор длины волны лазерного излучения за счет оптической обратной связи (рис. 2.4). С помощью дифракционной решетки обеспечивается усиление излучения только одной продольной моды лазера таким образом, что вся мощность сигнала концентрируется в очень узкой области спектра (ширина линии на половине высоты менее 100 МГц). При этом боковые моды подавляются до уровня не менее 40 дБ (рис. 2.5). Отношение мощности главного пика к мощности ближайшей боковой моды называют коэффициентом подавления боковых мод. Как и в лазере с резонатором Фабри-Перо, геометрия волновода обеспечивает высокую направленность и высокую степень поляризации выходного лазерного излучения.

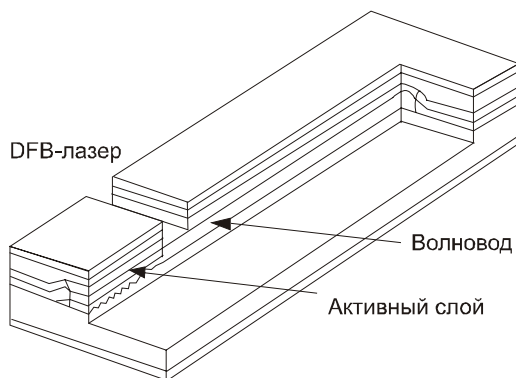


Рис. 2.4 Упрощенный вид кристалла DFB-лазера

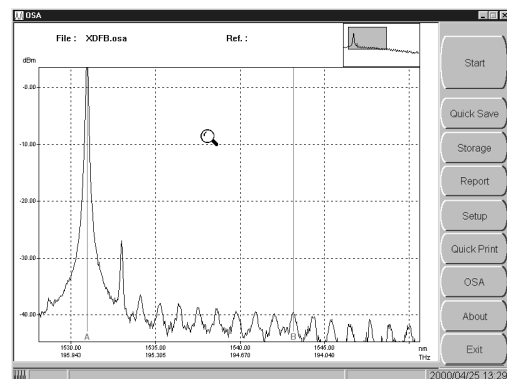


Рис. 2.5 Спектр излучения DFB-лазера

Модуль оптического передатчика с DFB-лазером может содержать также термоэлектрическое охлаждающее устройство, датчик температуры, оптический изолятор и контрольный фотодиод. Эффективность DFB-лазеров достаточно высока: выходная мощность в 0 дБм обеспечивается при токе накачки в 40 мА.

Модуляция излучения лазера является одним из проблемных вопросов. При низких скоростях передачи модулируется ток накачки лазера. При высоких скоростях передачи используется внешняя модуляция сигнала лазера, так как модуляция тока приводит к слишком большому чирпированию. Внешняя модуляция увеличивает стоимость и сложность системы, вносит дополнительные оптические потери и усложняет управление состоянием поляризации излучения.

Обычно для внешней модуляции используют интерферометры типа Маха-Цендера (Mach-Zehnder) или устройства электрического поглощения, основанные на технологии переключений. Для достижения высоких частот переключения часто используют волноводы на основе монокристаллов ниобата лития (LiNbO_3) или фосфида индия (InP) благодаря их большому показателю преломления. Высокая стоимость устройств интегральной оптики пока ограничивает применение таких модуляторов, однако совершенствование процесса производства и рост потребительского спроса на них должны изменить эту ситуацию в лучшую сторону.

Применение волоконных оптических усилителей EDFA и полупроводниковых оптических усилителей SOA (Semiconductor Optical Amplifier) позволило значительно увеличить мощность, вводимую в волокно после модулятора (до уровня больше +17 дБм). Поскольку значения мощности выше +17 дБм уже не соответствуют классу безопасности IIIb (Рекомендации IEC 60825), рассматривается возможность введения класса безопасности IM для лазеров с мощностью излучения, вводимой в волокно, +20 дБм и выше.

DFB-лазеры имеют несколько недостатков. Из-за очень узкой ширины линии генерации (и соответственно большой длины когерентности) они чувствительны к отраженному в линии сигналу, попадающему обратно активную область усиления лазера. Если в линии создаются параллельные частично отражающие поверхности в пределах длины когерентности лазера, это приводит к возникновению отраженного сигнала, когерентного с излучением лазера. Попадая в резонатор лазера, такой сигнал интерферирует с полезным сигналом и нарушает стабильность генерации лазера. Причем, интенсивность отраженного сигнала может иметь максимум при определенных температурах, что делает стохастическим и трудноуправляемым появление этого эффекта¹.

Стандартные длины волн передачи

Для того, чтобы компоненты систем WDM были взаимозаменяемы и могли взаимодействовать между собой, в системах WDM необходимо использовать стандартный набор частот генерации лазеров. Всеми вопросами, связанными со стандартизацией систем WDM занимается международный орган стандартизации – сектор стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (International Telecommunications Union, ITU) в рамках исследовательской группы SG15 по транспортным сетям, системам и оборудованию (Study Group 15 on Transport Networks, Systems and Equipment). Спецификации ITU-T G.692 по оптическим

¹ Основным способом борьбы с этим является применение на выходе передающего модуля оптического изолятора – прим. ред.

ОСНОВЫ

интерфейсам для многоканальных систем с оптическими усилителями определяет стандартный набор частот – частотный план систем WDM.

Частотный план ITU – это набор стандартных частот ν на основе базовой частоты 193100 ГГц. Стандартные частоты располагаются выше и ниже этой частоты с частотным интервалом в 50 ГГц. В табл. 2.2 частотный интервал составляет 100 ГГц. Для каждой частоты дана соответствующая длина волны λ ($\lambda = c/\nu$, $c=299792500$ м/с). Провайдерам услуг связи рекомендуется использовать оптические частоты в соответствии с частотным планом ITU.

Таблица 2. 2. Частотный план ITU

| ν (ТГц) | λ (нм) | ν (ТГц) | λ (нм) | ν (ТГц) | λ (нм) | ν (ТГц) | λ (нм) | ν (ТГц) | λ (нм) |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| 197,1 | 1521,02 | 195,0 | 1537,40 | 192,9 | 1554,13 | 190,8 | 1571,24 | 188,7 | 1588,73 |
| 197,0 | 1521,79 | 194,9 | 1538,19 | 192,8 | 1554,94 | 190,7 | 1572,06 | 188,6 | 1589,57 |
| 196,9 | 1522,56 | 194,8 | 1538,98 | 192,7 | 1555,75 | 190,6 | 1572,89 | 188,5 | 1590,41 |
| 196,8 | 1523,34 | 194,7 | 1539,77 | 192,6 | 1556,56 | 190,5 | 1573,71 | 188,4 | 1591,26 |
| 196,7 | 1524,11 | 194,6 | 1540,56 | 192,5 | 1557,36 | 190,4 | 1574,54 | 188,3 | 1592,10 |
| 196,6 | 1524,89 | 194,5 | 1541,35 | 192,4 | 1558,17 | 190,3 | 1575,37 | 188,2 | 1592,95 |
| 196,5 | 1525,66 | 194,4 | 1542,14 | 192,3 | 1558,98 | 190,2 | 1576,20 | 188,1 | 1593,79 |
| 196,4 | 1526,44 | 194,3 | 1542,94 | 192,2 | 1559,79 | 190,1 | 1577,03 | 188,0 | 1594,64 |
| 196,3 | 1527,22 | 194,2 | 1543,73 | 192,1 | 1560,61 | 190,0 | 1577,86 | 187,9 | 1595,49 |
| 196,2 | 1527,99 | 194,1 | 1544,53 | 192,0 | 1561,42 | 189,9 | 1578,69 | 187,8 | 1596,34 |
| 196,1 | 1528,77 | 194,0 | 1545,32 | 191,9 | 1562,23 | 189,8 | 1579,52 | 187,7 | 1597,19 |
| 196,0 | 1529,55 | 193,9 | 1546,12 | 191,8 | 1563,05 | 189,7 | 1580,35 | 187,6 | 1598,04 |
| 195,9 | 1530,33 | 193,8 | 1546,92 | 191,7 | 1563,86 | 189,6 | 1581,18 | 187,5 | 1598,89 |
| 195,8 | 1531,12 | 193,7 | 1547,72 | 191,6 | 1564,68 | 189,5 | 1582,02 | 187,4 | 1599,75 |
| 195,7 | 1531,90 | 193,6 | 1548,51 | 191,5 | 1565,50 | 189,4 | 1582,85 | 187,3 | 1600,60 |
| 195,6 | 1532,68 | 193,5 | 1549,32 | 191,4 | 1566,31 | 189,3 | 1583,69 | 187,2 | 1601,46 |
| 195,5 | 1533,47 | 193,4 | 1550,12 | 191,3 | 1567,13 | 189,2 | 1584,53 | 187,1 | 1602,31 |
| 195,4 | 1534,25 | 193,3 | 1550,92 | 191,2 | 1567,95 | 189,1 | 1585,36 | 187,0 | 1603,17 |
| 195,3 | 1535,04 | 193,2 | 1551,72 | 191,1 | 1568,77 | 189,0 | 1586,20 | 186,9 | 1604,03 |
| 195,2 | 1535,82 | 193,1 | 1552,52 | 191,0 | 1569,59 | 188,9 | 1587,04 | 186,8 | 1604,88 |
| 195,1 | 1536,61 | 193,0 | 1553,33 | 190,9 | 1570,42 | 188,8 | 1587,88 | 186,7 | 1605,74 |

Стабилизаторы длины волны

Успешная работа сетей WDM и DWDM во многом зависит от стабильности источника сигнала. Для того, чтобы приемники, фильтры, аттенюаторы и волновые разветвители правильно выполняли свои функции, частота сигнала должна выдерживаться с очень высокой точностью². Это обеспечивают стабилизаторы длины волны², рис. 2.06.

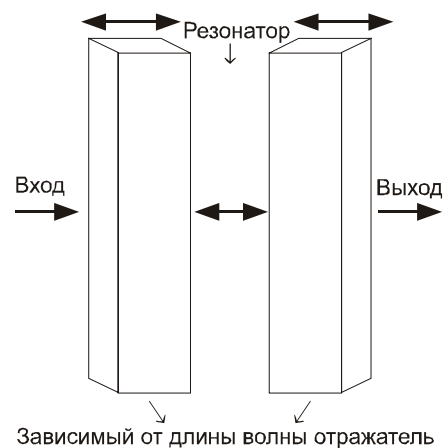


Рис. 2.6. Упрощенная схема работы стабилизатора длины волны

² Стабилизаторы длины волны осуществляют блокировку излучения лазера за пределами ширины полосы для каждой номинальной частоты излучения – прим. ред.

Точная длина волны излучения лазера устанавливается путем изменения его температуры или с помощью его подкачки электрическим током. При этом стабилизатор длины волны выдает управляющий сигнал для задания длины волны излучения лазера. Обычно стабилизатор состоит из двух последовательно расположенных диэлектрических оптических фильтров. Один фильтр настроен на частоту, немного выше номинальной, другой – на частоту, на то же значение ниже номинальной. При прохождении оптического сигнала через эти фильтры выдается управляющий электрический сигнал, показывающий, насколько далеко длина волны источника сместилась от номинального значения.

Диэлектрические фильтры обладают исключительно высокой стабильностью и могут быть настроены на пропускание очень узкого, точно позиционированного диапазона длин волн. Стабилизаторы длины волны, использующие диэлектрические фильтры, обеспечивают требуемую для источников излучения систем WDM высокую стабильность длины волны в течение длительного времени.

2.5.2 Фотоприемники

Оптический фотоприемник преобразует входные оптические сигналы в электрические и осуществляет таким образом их демодуляцию. Фотоприемник должен быть полностью совместим с передатчиком как по спектральной области чувствительности в пределах номинальных длин волн, так и временным характеристикам модуляции излучения. Кроме того, фотоприемник должен обладать устойчивостью к ошибкам, которые могут возникнуть в сигнале при прохождении других оптических компонентов.

Оптический сигнал подается на фотоприемник непосредственно из волокна, что обеспечивается традиционным способом – их торцевой стыковкой. Полученный на фотоприемнике электрический сигнал необходимо усилить до требуемого уровня, внося при этом как можно меньше шумов. Может понадобиться также электронная фильтрация, для сглаживания эффективного частотного отклика усилителя. Все эти операции обычно выполняются одним гибридным модулем (включающим и модуль приемника), на который поступает входной оптический сигнал из волокна. Модуль формирует на выходе отфильтрованный электрический сигнал, который затем требуется соответствующим образом демодулировать. Сложность процесса демодуляции зависит от используемой технологии модуляции. Например, при использовании технологии TDM необходимо выделить из поступившего сигнала сигналы синхронизации, для чего могут использоваться различные схемы выявления и исправления ошибок.

Обычно в качестве фотоприемников используется два типа фотодиодов: PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды APD (Avalanche Photodiode). PIN-фотодиоды работают со стандартными низковольтными источниками питания (5 В), но они менее чувствительны и имеют более узкую область спектральной чувствительности по сравнению с лавинными фотодиодами. До появления лавинных фотодиодов высокоскоростные PIN-фотодиоды использовались на линиях связи со скоростями передачи 10 Гбит/с и 40 Гбит/с. Лавинные фотодиоды в основном применяются на линиях связи большой протяженности, где оправданы их высокая стоимость и значительно более сложные схемы регистрации оптических сигналов. Кроме того, во

ОСНОВЫ

многих случаях использование фотоприемника с лавинным фотодиодом позволяет отказаться от оптического предусилителя, необходимого в фотоприемнике с PIN-фотодиодом.

Важнейшие характеристики при выборе фотоприемника – это спектральная чувствительность (отношение силы тока к мощности оптического сигнала A/W в зависимости от длины волны), пороговая чувствительность (уровень входного сигнала, при котором он уже перестает различаться из-за шумов фотоприемника), спектральная и электрическая полосы пропускания, динамический диапазон, уровень шумов. Допустимое значение каждой характеристики фотоприемника зависит от его конкретного применения. Например, шумовые характеристики становятся более значимыми, когда перед фотоприемником установлен оптический предусилитель большой мощности. Кроме этого, следует обратить внимание на необходимость оптической фильтрации – такой же, как и в демультиплексоре – для уменьшения усиленной спонтанной эмиссии.

2.5.3 Атенюаторы

В линии связи после оптического передатчика часто устанавливают аттенюаторы, которые позволяют уменьшать их выходную мощность до уровня, соответствующего возможностям расположенных далее мультиплексоров и усилителей EDFA (рис. 2.7).

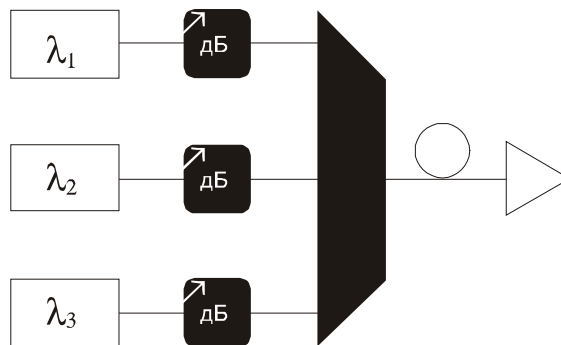


Рис. 2.07. Атенюаторы расположены между передатчиками и мультиплексором

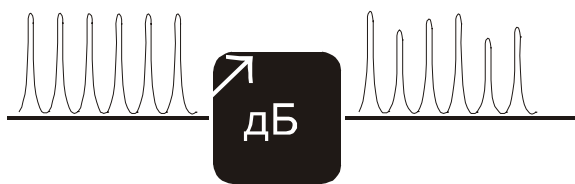


Рис. 2.8-а Избирательное ослабление сигналов разных длин волн

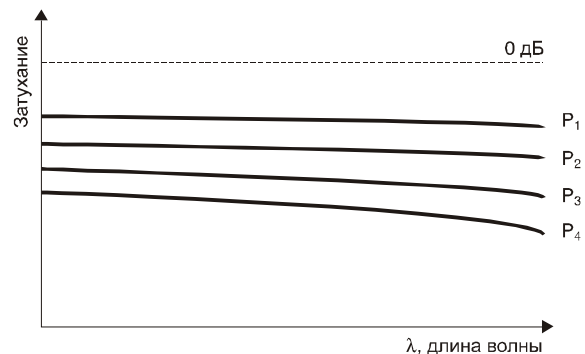


Рис. 2.8-б. Ослабление сигнала в зависимости от его мощности ($P_1 < P_2 < P_3 < P_4$)

Применение мощных лазеров в передатчиках оправдано при отказе от необходимости использования промежуточных усилителей сигнала на линии. При этом на определенных участках сети может понадобиться ослабление мощности сигнала с помощью аттенюатора, чтобы большая мощность сигнала не приводила к нелинейным

явлениям в некоторых компонентах систем WDM. Избирательное (по длинам волн) ослабление мощности часто требуется и для того, чтобы "выровнять" спектр сигнала на входе в усилителя EDFA и обеспечить равномерное усиление для всех каналов (рис. 2.8-а.). Это особенно важно, когда в усилителе EDFA происходит добавление или выделение каналов. Ослабление сигнала также зависит от его мощности: чем выше мощность сигнала, тем сильнее излучение вследствие нелинейных эффектов и, как следствие, больше ослабление сигнала, рис. 2.8-б.

2.5.4 Коммутаторы

В сетях WDM коммутаторы применяют для того, чтобы при возникновении неисправностей в сети направить сигнал по другому оптическому пути или через другую сеть.

Поначалу коммутация в волоконно-оптических сетях включала в себя преобразование оптического сигнала в электрическую форму, выполнение необходимых переключений и обратное преобразование сигнала в оптическую форму. Этот громоздкий и дорогой процесс ограничивал скорость коммутации и снижал работоспособность систем WDM³.

Сложность современных сетей и требования к их надежности за последние годы значительно возросли. Раньше в оптической сети было достаточно нескольких коммутаторов с простыми возможностями перенаправления сигнала, теперь в сетях требуются мощные системы кросс-коммутации типа NxN, выполняющие сложные операции по полной переконфигурации N оптических сигналов. Способность осуществлять полную неблокируемую коммутацию сигналов становится крайне важной функцией для современных полностью оптических сетей. Поэтому огромную практическую важность приобрели устройства оптической кросс-коммутации ОХС (Optical Cross Connect), в которых не происходит оптоэлектронного преобразования⁴.

Ранее обычно использовались коммутаторы типа 1xN с электрическим управлением, переключающие сигнал со входного волокна между несколькими выходными волокнами. В оптических сетях они выполняли функцию восстановления связи и не позволяли осуществлять динамическое выделение или перераспределение полосы пропускания.

2.5.5 Устройства оптической кросс-коммутации ОХС

Для перенаправления нескольких каналов могут использоваться простые оптические переключатели. Однако, они не подходят для сложных сетевых архитектур (кольцевой, ячеистой) с большим количеством узлов и точек доступа, где необходима гибкая быстрая коммутация большого числа каналов. Несколько лет назад начали внедряться технологии оптической кросс-коммутации.

Поначалу коммутация была оптомеханической – выполнялась с помощью крошечных зеркал, размещенных на пути оптического луча. Использование микротехнологии и

³ Такой способ коммутации получил название «непрозрачной коммутации» – прим. ред.

⁴ «Прозрачная коммутация» – прим. ред.

ОСНОВЫ

технологии на основе систем MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) позволяет разместить множество коммутирующих линз и микрзеркал вместе с их приводами на одном кремниевом кристалле. Такие устройства могут иметь сотни портов, обладают низкими вносимыми потерями, очень высокой изоляцией каналов (до 80 дБ) и могут использоваться в широком диапазоне длин волн.

В настоящее время с целью разработки устройств кросс-коммутации изучаются возможности применения полностью оптических технологий на основе оптических волноводов, жидких кристаллов и технологии цилиндрических магнитных доменов, параметры которых можно быстро менять с помощью изменения температуры, управляющего электрического тока или оптических вентилях (отдельных оптических усилителей, которые можно быстро включать и выключать).

Постоянно возрастающий спрос на быстрое, надежное и недорогое оборудование для оптической коммутации будет в ближайшем будущем стимулировать научные исследования и разработки в этой области.

Адресные устройства ввода/вывода каналов

Адресные устройства ввода/вывода каналов (Addressable Add/Drop Device) обеспечивают селективную маршрутизацию каналов в системах DWDM. В этих устройствах оптические коммутаторы применяются вместе с другими компонентами, основанными на технологии коммутации волокон или на технологии коммутации длины волны. Адресные устройства ввода/вывода каналов дают возможность осуществлять маршрутизацию полностью на оптическом уровне и исключают, таким образом, необходимость преобразования оптического сигнала в электрический и затем обратно. Неплохим примером такой технологии являются решетка массива волноводов AWG. Общая схема устройства оптической кросс-коммутации ОХС показана на рис. 2.9. В этом устройстве оптические каналы с различными длинами волн, поступающие на входные порты, могут переключаться между всеми выходными портами произвольным образом. Такое устройство может быть дополнено управляемым портом, позволяющим осуществлять селективную маршрутизацию по длине волны.

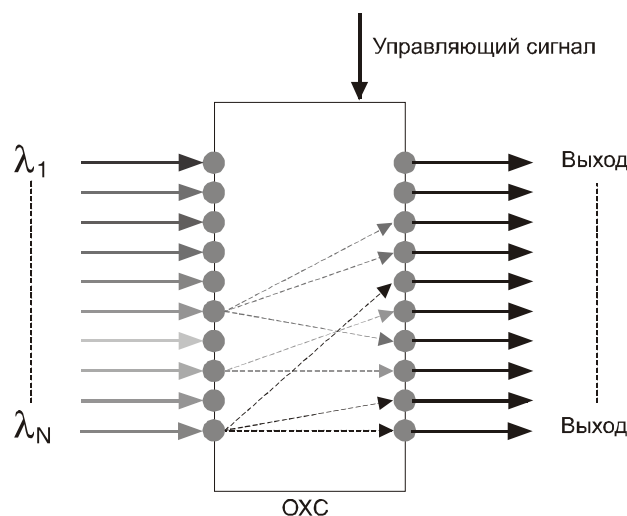


Рис. 2.9 Канал с длиной волны λ_i с любого входного порта может быть перенаправлен на любой выходной порт

2.5.6 Волновые разветвители

В системах WDM часто бывает необходимо выделять отдельные информационные каналы с заданной длиной волны. В настоящее время имеются полностью пассивные оптические устройства, выполняющие эту функцию. Зависимость параметров от частоты, которую нужно избегать при производстве таких оптических компонентов, как широкополосные разветвители, в то же время может быть использована для производства компонентов с сильной зависимостью выходного сигнала от длины волны на входе, что и имеет место в случае волновых разветвителей. В первых системах WDM волновые разветвители повсеместно использовались для разделения длин волн 1310 нм и 1550 нм, или для объединения сигнала накачки с длиной волны 980 нм или 1480 нм с входным сигналом с длиной волны 1550 нм в волокне, легированном эрбием, в усилителе EDFA.

2.5.7 Устройства компенсации дисперсии

Оптическое волокно и некоторые компоненты систем WDM обладают хроматической дисперсией. Показатель преломления волокна зависит от длины волны сигнала, что приводит к зависимости скорости распространения сигнала от длины волны (материальная дисперсия). Даже если показатель преломления не зависел бы от длины волны, сигналы разных длин волн все равно распространялись бы с разной скоростью из-за внутренних геометрических свойств волокна (волноводная дисперсия). Результирующее воздействие материальной и волноводной дисперсий называется хроматической дисперсией.

Хроматическая дисперсия приводит к уширению оптических импульсов по мере их распространения по волокну, рис. 2.10. При большой протяженности линии связи это проявляется в том, что близко идущие импульсы начинают перекрываться, ухудшая сигнал. Устройства компенсации дисперсии DCD (Dispersion Compensation Devices) придают сигналу равную по величине, но противоположную по знаку дисперсию и восстанавливают первоначальную форму импульсов. Наиболее распространены два типа устройств DCD – волокна, компенсирующие дисперсию DCF (Dispersion Compensating Fibers) и решетки, компенсирующие дисперсию DCG (Dispersion Compensating Gratings).

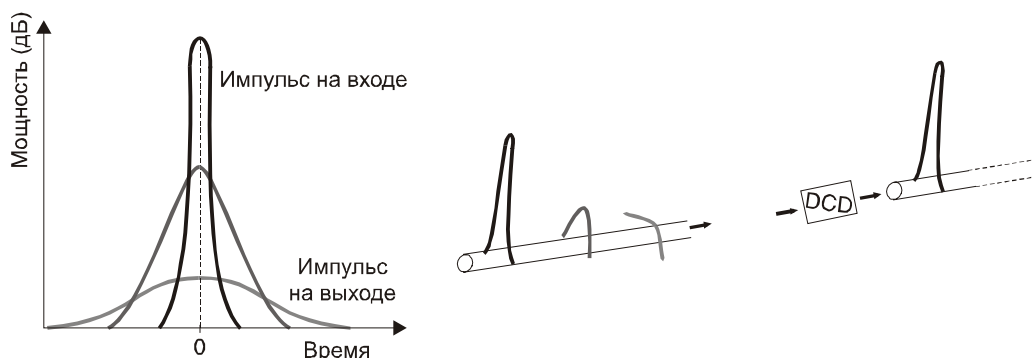


Рис. 2.10. Уширение импульсов, вызванное дисперсией, и его компенсация

2.5.8 Мультиплексоры и демультиплексоры

Каждый лазерный передатчик в системе WDM выдает сигнал на одной из заданных частот. Все эти сигналы (каналы) необходимо мультиплексировать (объединить друг с другом) в единый составной сигнал. Устройство, которое выполняет эту функцию, называется оптическим мультиплексором MUX (или OM). Аналогичное устройство на другом конце линии связи разделяет составной сигнал на отдельные каналы и называется оптическим демультиплексором DEMUX (или OD). В отличие от систем TDM, в которых подобные операции уплотнения каналов происходят во временной области, и основное внимание уделяется точности синхронизации приемника и передатчика, в системах WDM мультиплексированию и демультиплексированию подвергаются спектральные компоненты отдельных сигналов, характеристики которых всегда известны заранее.

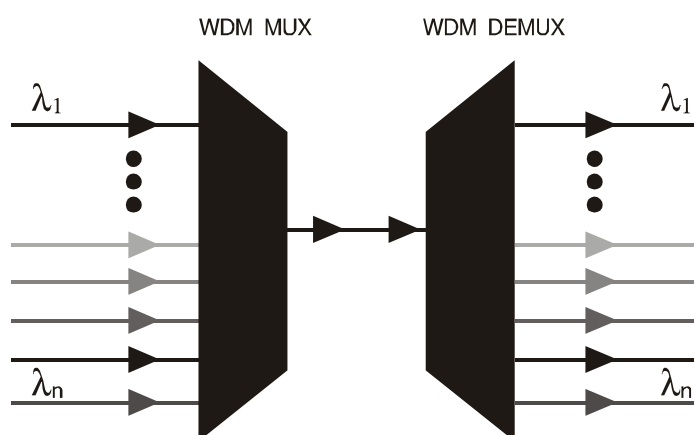


Рис. 2.11. Мультиплексор и демультиплексор

Оптическое мультиплексирование и демультиплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. В частности, для фильтрации применяют тонкопленочные фильтры, волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки, сварные биконические волоконные разветвители, фильтры на основе жидких кристаллов, устройства интегральной оптики (матрицы фазовых волноводных дифракционных решеток или фазары).

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства оптического мультиплексирования и демультиплексирования с частотным интервалом между отдельными каналами в 100 ГГц (~0,8 нм), наиболее распространенный в существующих системах WDM. Появляющиеся в последнее время мультиплексные устройства могут обеспечить большую плотность размещения каналов с частотным интервалом 50 ГГц и меньше. Современные оптические мультиплексоры создаются преимущественно на основе тонкопленочных фильтров и, немного реже – на матрицах волноводных дифракционных решеток и волоконных брэгговских решетках. При дальнейшем увеличении плотности размещения каналов в системах DWDM и ужесточении требований к оптическим устройствам MUX/DEMUX, по-видимому, будет меняться и спектр используемых технологий.

Технологии мультиплексирования

Хотя подробное обсуждение механизмов, лежащих в основе оптического мультиплексирования и демultipлексирования, выходит за рамки данной книги, мы в общих чертах опишем наиболее часто применяемые механизмы волнового разделения каналов.

Тонкопленочные фильтры

Тонкопленочный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Надлежащим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные (рис. 2.12).

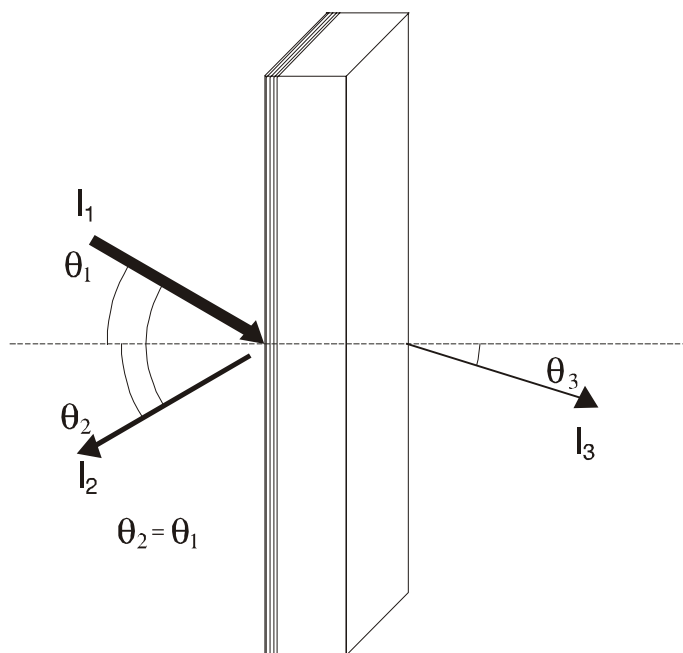


Рис. 2.12 λ_1 – падающая волна, λ_2 – отраженная, λ_3 – прошедшая

Методы выбора параметров и техника нанесения диэлектрических слоев хорошо известны в оптической промышленности десятки лет. Выбор диэлектрических материалов ограничен, так как многие материалы с хорошими оптическими свойствами имеют физические качества, далекие от требуемых. В общем случае, чем жестче требования к фильтру, тем большее число слоев необходимо нанести на подложку. Несмотря на имеющиеся сложности, эта технология позволяет, незначительно изменяя процесс производства, создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

ОСНОВЫ

В мультиплексорах и демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему. Наклонное расположение фильтров изменяет эффективную толщину слоев и меняет таким образом полосу пропускания, что необходимо учитывать при проектировании фильтров. Для обработки многоволновых сигналов используют многоступенчатые системы фильтров, в которых свет, отраженный от каждого фильтра, попадает на вход следующего фильтра, что придает исключительную важность вопросу их выравнивания (рис. 2.13).

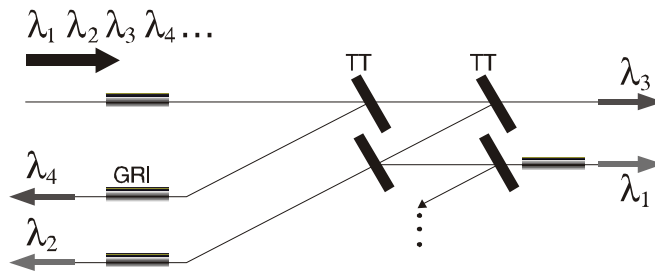


Рис. 2.13 Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

Тонкопленочные фильтры имеют достаточно узкую полосу пропускания и используются в системах WDM с 16-ю или 32-мя каналами. В современных системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

Волоконные брэгговские решетки

Волоконная брэгговская решетка – это, по сути, оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное некоторыми веществами (обычно германием), может изменять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Другими словами, это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.

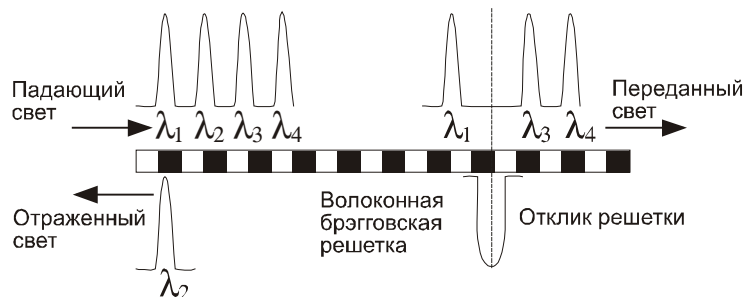


Рис. 2.14 Волоконная брэгговская решетка выделяет из составного сигнала канал определенной длины волны

Если структура не вполне периодическая, и период модуляции ее показателя преломления изменяется монотонно (происходит чирпирование), то получается дифракционная решетка с линейно изменяющимся периодом. Такие решетки используются для компенсации хроматической дисперсии в волоконной линии связи или для коррекции чирпированного сигнала лазерного источника.

Центральная длина волны фильтра на основе регулярной волоконной брэгговской решетки определяется ее периодом, полоса пропускания обратно пропорциональна ее длине. Оба этих параметра зависят от температуры, поэтому такие фильтры должны быть помещены в термостат или другое устройство, контролирующее температуру.

Волоконная брэгговская решетка может использоваться как оптический фильтр в устройствах мультиплексирования и демультиплексирования, как компенсатор хроматической дисперсии, или в комбинации с циркуляторами в мультиплексорах ввода/вывода каналов (рис. 2.15).

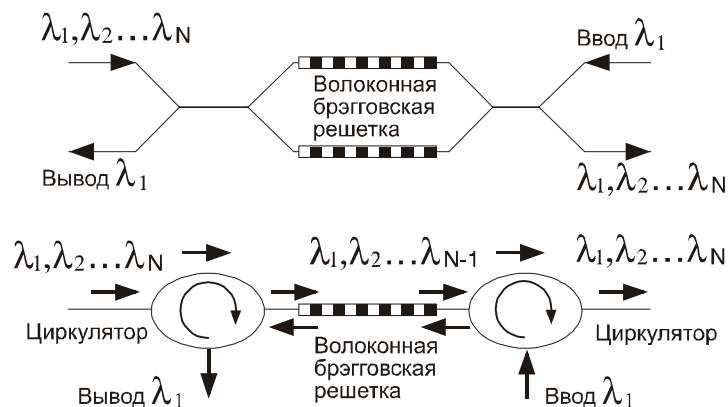


Рис. 2.15 Использование волоконных брэгговских решеток в мультиплексорах ввода/вывода каналов

В мультиплексорах ввода/вывода каналов волоконная брэгговская решетка может использоваться вместе с двумя циркуляторами. редко используются в пассивных компонентах систем DWDM сами по себе. Со стороны порта вывода канала циркулятор выделяет отраженную волну и направляет ее в порт вывода (рис. 2.15, слева). Со стороны порта ввода циркулятор добавляет в передаваемый составной сигнал один канал на той же длине волны, что была выделена (рис. 2.15, справа). Такие устройства часто используются на границе между магистральным каналом и сетью городского или регионального масштаба. В магистральном канале обычно очень много длин волн, в то время как в городских или региональных сетях их намного меньше.

Волоконные брэгговские решетки в последнее время также стали использоваться в устройствах мультиплексирования и демультиплексирования вместе с интерферометрами типа Маха-Цендера и в комбинации с другими типами фильтров.

Наряду с мультиплексорами и демультиплексорами, рассмотренная технология узкополосной фильтрации оптических каналов также используется для выравнивания спектра сигнала перед усилителями EDFA, для стабилизации длины волны и в волновых стабилизаторах.

Дифракционные решетки

Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рис. 2.16).

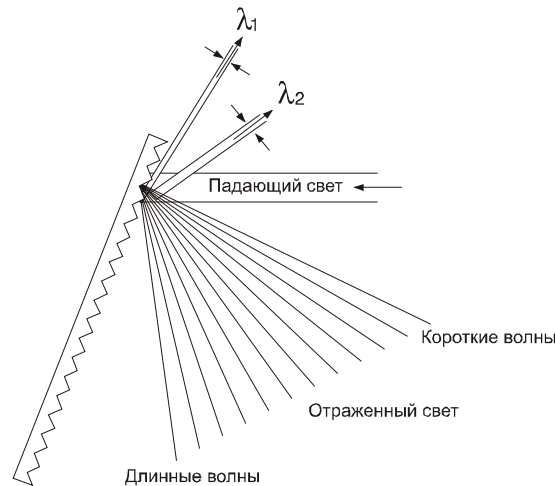


Рис. 2.16 Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

Представим, что в падающем свете присутствует излучение разных длин волн. Можно выбрать угол падения таким образом, что волны определенной длины при отражении от отдельных линий решетки будут отличаться по фазе друг от друга ровно на одну длину волны. В этом случае все отраженные волны будут усиливать друг друга. Такой угол будет углом максимального пропускания для заданной длины волны падающего света.

В устройствах мультиплексирования и демultipлексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлять в него. Хотя устройства на основе дифракционных решеток дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери практически не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов. Однако при этом требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.

Устройства интегральной оптики

Интегральные оптические устройства мультиплексирования и демultipлексирования – это оптический эквивалент интегральных схем в электронике. Оптические волноводы в несколько слоев помещаются на подложку из кремния или ниобата лития. В таком небольшом блоке содержится множество оптических компонентов, взаимосвязанных друг с другом. При использовании современного полностью автоматизированного оборудования возможно массовое производство таких блоков.

Интегральная оптика – относительно новая технология. Для того чтобы полностью использовать ее потенциал, требуются дальнейшие научные исследования и конструкторские разработки. В настоящее время интегральная оптика используется при производстве оптических разветвителей, коммутаторов, модуляторов, эрбиевых и легированных различными редкоземельными элементами волноводных усилителей, брэгговских решеток и других компонентов систем DWDM.

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG (Arrayed Waveguide Gratings), рис. 2.17.

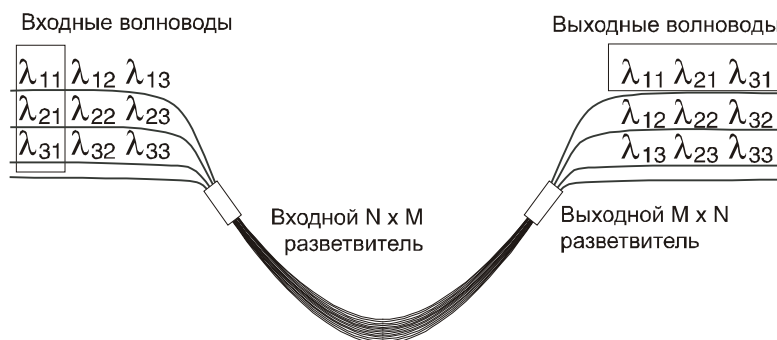


Рис. 2.17 Решетка на основе массива волноводов AWG – принцип работы

Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны. После этого световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рис. 2.17) или выделить (демultipлексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демultipлексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

Решетки AWG еще также называют “драконовыми маршрутизаторами” (Dragon Routers), фазовыми матрицами или фазарами.

Сварные биконические разветвители

Простейший биконический разветвитель FBT (Fused Biconic Tapered) представляет собой пару одномодовых оптических волокон, на определенном участке сваренных друг с другом по длине. Основная мода волокна, которая распространяется по сердцевине одного из оптических волокон, при прохождении области сварки преобразуется в моды оболочки. Когда волокна снова разделяются, моды оболочки снова преобразуются в моды волокна, распространяющиеся по сердцевине каждого из выходных волокон. В результате получается разветвитель, практически не вносящий потерь. Выходные сигналы не обязательно имеют равную мощность, соотношение их мощностей определяется интерференцией в области сварки волокон и зависит от длины этой области.

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рис. 2.18), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цендера. Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин волн, то при определенном подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется.

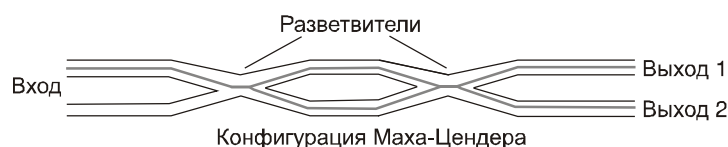


Рис. 2.18 Входной сигнал распределяется между двумя выходами

Если на вход поступает составной сигнал, который содержит большое количество каналов на разных частотах (с одинаковыми расстояниями между ними), на выходе в каждом волокне будет по половине каналов с расстоянием между частотами в два раза больше. Используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.

Массивы таких устройств, отдельные секции которых иногда заменены брэгговскими решетками, используются для выделения каналов определенной частоты из многоканальных систем WDM и DWDM или для добавления каналов в каком-либо узле оптической сети. Поскольку они являются полностью пассивными устройствами и имеют низкие потери, допустимо применение достаточно больших наборов таких устройств.

2.5.9 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов

Мультиплексоры и демультиплексоры с помощью различных методов волнового разделения объединяют несколько оптических сигналов для передачи по одному волокну и разделяют эти сигналы после передачи. Однако, часто требуется добавить в составной сигнал или выделить из него только один канал, не меняя при этом всю структуру сигнала. Для этого применяют мультиплексоры ввода/вывода каналов OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), которые выполняют эту операцию, не преобразуя сигналы всех каналов в электрическую форму и затем обратно (рис. 2.19).

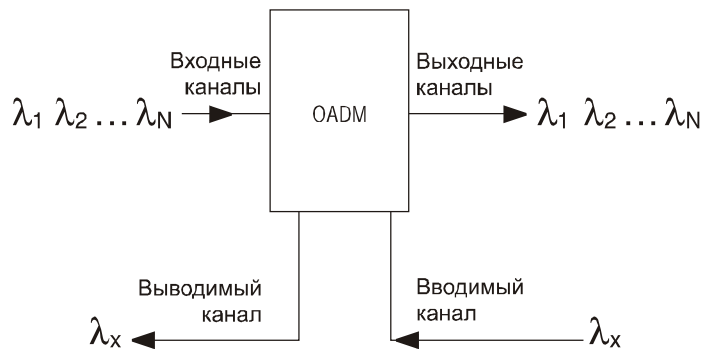


Рис. 2.19 Мультиплексор ввода/вывода каналов

При конструировании мультиплексоров ввода/вывода используются технологии, описанные в разделе 2.5.8. Сегодня на рынке есть разнообразные устройства, позволяющие добавлять и выделять каналы SDH из сетей WDM. Разрабатываются мультиплексоры ввода/вывода, конфигурацию которых можно менять дистанционно.

2.5.10 Оптические усилители

Усилители на волокне, легированном эрбием EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) за последние несколько лет произвели революцию в телекоммуникационной промышленности. Усилители EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна (рис. 2.20). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.

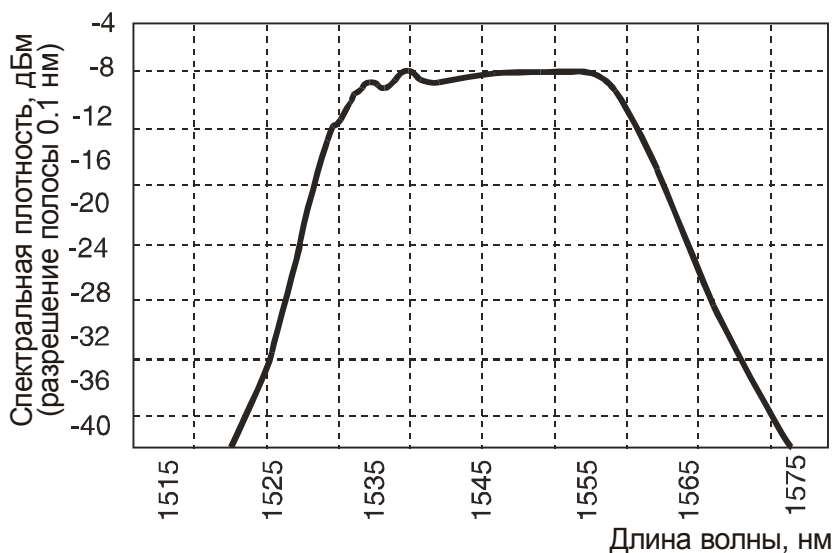


Рис. 2.20 Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. В простейших конструкциях EDFA усиление происходит в

ОСНОВЫ

достаточно узком диапазоне длин волн – примерно от 1525 нм до 1565 нм. В эти 40 нм умещается несколько десятков каналов DWDM.

Обычные электронные повторители, чтобы восстановить уровень сигнала на протяженной линии связи, считывают сигнал с волокна, преобразуют его в электрические импульсы, усиливают их, преобразуют усиленный сигнал снова в оптическую форму и передают дальше по линии связи. В отличие от них, усилители EDFA полностью "прозрачны" – не зависят от используемых протоколов, форматов, скорости передачи и (в пределах указанных выше ограничений) длины волны оптического сигнала. Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам ATM или компонентам протокола IP – не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость – одно из основных преимуществ использования их в системах DWDM. Наряду с этим, при использовании усилителей EDFA требуется тщательно учитывать их неоднородное спектральное усиление и шум, вносимый ими за счет усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). Сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети. Каждая линия связи уровня OC-48 (STM-16) обрабатывается в системе DWDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем DWDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем DWDM в эксплуатацию достаточно низка.

Оптические усилители успешно используются в сетях кабельного телевидения CATV, когда один общий сигнал передается большому числу абонентов ("широковещание"). Сейчас еще достаточно редко прокладывают оптическое волокно непосредственно до квартиры FTTH (Fiber to the Home). Сигнал CATV обычно доставляется по оптическому волокну только до локальной точки распределения внутри дома FTTB (Fiber to the Building) или поблизости от группы домов FTTC (Fiber to the Curb), а конечная разводка осуществляется с помощью коаксиального кабеля. Для уверенного приема аналоговых сигналов, которые в основном используются в CATV, требуется большее отношение сигнал/шум на стороне получателя, чем для цифровых систем. Общий сигнал в сетях CATV должен иметь большую мощность, так как его энергия распределяется между сотнями и тысячами абонентов. Оптические усилители способны успешно справиться с этой задачей.

Для того чтобы технология FTTH стала экономически оправданной, необходимо обеспечить абонентов недорогими – а значит, не очень чувствительными приемниками. В этом случае также требуется обеспечить передачу к конечным точкам сети как можно более мощного сигнала. Таким образом, потребность сетей CATV в "прозрачных", гибких оптических усилителях достаточно очевидна.

Разработка различных схем мощной накачки позволила создать усилители EDFA с расширенным рабочим диапазоном от 1570 нм до 1605 нм (L-диапазон). Такие усилители также называют длинноволновыми усилителями LWEDFA (Long Wavelength EDFA).

Лазеры накачки

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки (рис. 2.21). Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность накачки. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.

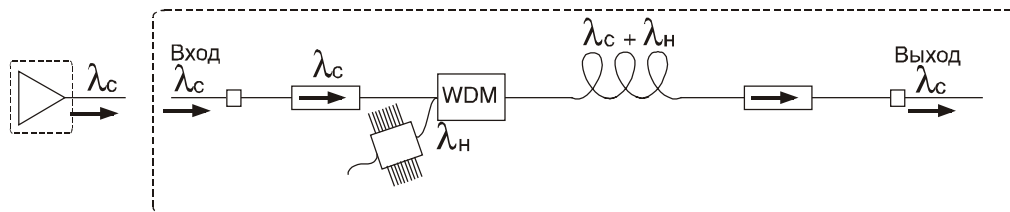


Рис. 2.21 Схема EDFA

Для накачки усилителей EDFA подходят лазеры с длинами волн излучения 980 нм и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием. Однако при выборе того или иного типа лазеров накачки приходится идти на компромисс. С одной стороны, усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума, чем усилители с лазерами 1480 нм, что лучше для многоканальных систем и предусилителей систем DWDM. С другой стороны, использование лазеров 1480 нм позволяет создать более мощные усилители за меньшую цену. Выбор осложняется тем, что тип лазеров накачки необходимо определить в самом начале проектирования сети, когда еще не известно окончательное число каналов и достаточно сложно определить, что важнее – высокая мощность усилителя или низкий уровень его шума. В некоторых усилителях EDFA используется накачка на двух длинах волн, что позволяет совместить преимущества обоих способов.

Если лазерный передатчик выдает в волокно с типичным затуханием 0,2 дБ/км в области длины волны 1550 нм сигнал мощностью +16 дБм, то после прохождения 80 км мощность этого сигнала упадет до уровня 0 дБм (1 мВт) (не учитываются другие источники потерь, таких как стыки и т. д.). Если же лазер выдает сигнал мощностью 0 дБм, то при прохождении тех же 80 км он понизится до уровня –16 дБм. На первых этапах развития волоконно-оптической связи лазеры имели относительно низкую мощность, и сигнал необходимо было восстанавливать электронными методами при прохождении расстояний много меньших, чем 80 км. Электронный повторитель получал оптический сигнал, преобразовывал его в электрический, усиливал и снова преобразовывал в оптический. Хотя эта технология не имела спектральных ограничений и позволяла с равным успехом восстанавливать сигналы как на 1310 нм, так и на 1550 нм, она была достаточно сложной, а увеличение скорости передачи системы требовало замены повторителей.

В начале 1980-х годов Пэйн (Payne) и Ламинг (Laming) из Саутгэмптонского университета (University of Southampton) в Великобритании предложили усиливать оптические сигналы без оптоэлектронного преобразования с помощью волокна, легированного эрбием. С этого момента началась эпоха полностью оптических повторителей. У предложенной технологии было одно небольшое ограничение: она

ОСНОВЫ

позволяла усиливать сигналы только в узком спектральном диапазоне с центром на длине волны 1550 нм.

Возможно несколько схем накачки EDFA на длинах волн 1480 нм или 980 нм (рис. 2.22).

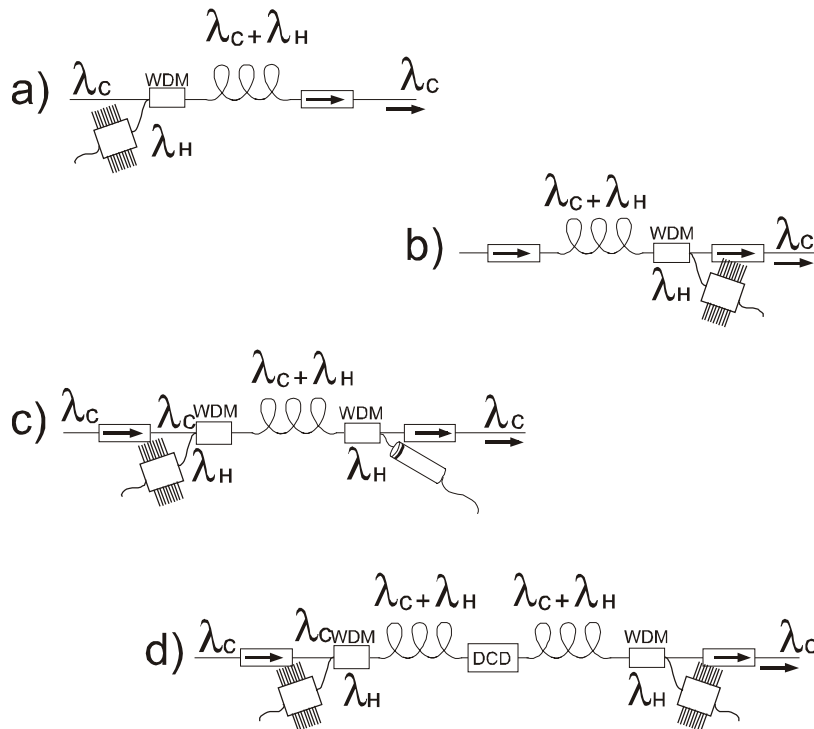


Рис. 2.22 Типовые схемы накачки EDFA (DCD – устройство компенсации дисперсии, dispersion compensation device)

Прямое направление накачки (рис. 2.22-а) дает наиболее низкий уровень шума. Это предпочтительно при небольшой мощности входного сигнала и максимальных значениях коэффициента усиления (область А, рис. 2.23). При обратном направлении накачки (рис. 2.22-б) проще достигается режим насыщения. Это предпочтительно в тех случаях, когда требуется на выходе сигнал максимально возможную мощность (область С, рис. 2.23).

При совместном применении двух лазеров накачки различных длин волн рекомендуется осуществлять накачку на 1480 нм в обратном направлении, а накачку на 980 нм – в прямом. Это позволяет наилучшим образом использовать преимущества обоих методов. Лазер накачки 1480 нм обладает более высокой квантовой эффективностью, но при этом и несколько более высоким коэффициентом шума, в то время как для лазера 980 нм можно снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций.

В EDFA с одноступенчатой накачкой максимальная мощность выходного сигнала, достигаемая в режиме насыщения (область С, рис. 2.23), составляет около +16 дБм. Его коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А, рис. 2.23) равен 5-6 дБ. В EDFA с двумя лазерами накачки (980 нм и 1480 нм) достигается более высокая мощность выходного сигнала – до +26 дБм. Чтобы снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций (что необходимо для многих предусилителей) применяют многокаскадную конструкцию: сразу за первым каскадом усиления помещается оптический изолятор, который препятствует распространению в обратном направлении усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission) второго каскада.

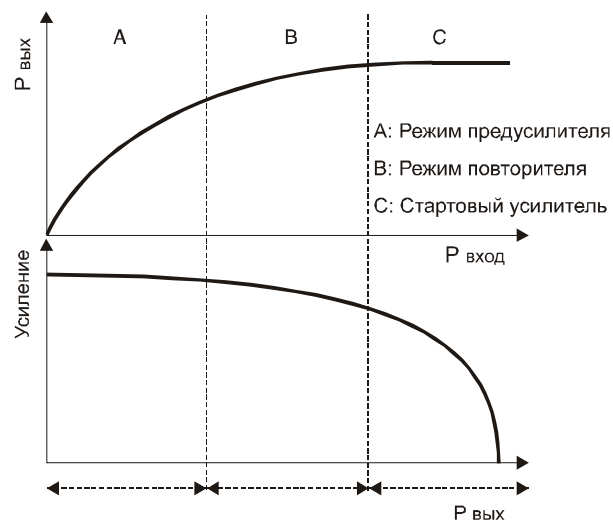


Рис. 2.23. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала и различные режимы работы EDFA

Усилители EDFA могут использоваться по-разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления (рис. 2.23).

- В режиме насыщения (область С, рис. 2.23) – как усилитель мощности (бустер) сразу после лазера передатчика. Бустер повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить расстояние до первого повторителя.
- В режиме промежуточных значений усиления и шума (область В, рис. 2.23) – как повторитель. Повторитель усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума.
- В режиме наименьшего шума (область А, рис. 2.23) – как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи. Предусилитель практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром.

Усилитель EDFA имеет неравномерное спектральное распределение коэффициента усиления для слабых входных сигналов (рис. 2.24).

ОСНОВЫ

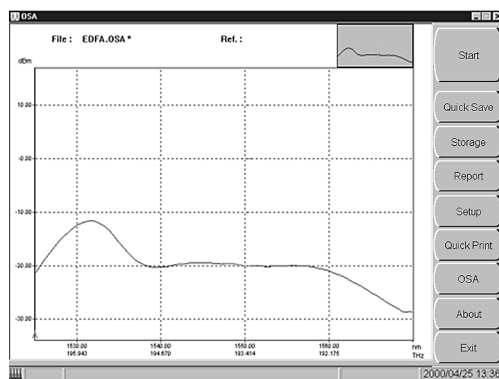


Рис. 2.24. Типовое спектральное распределение коэффициента усиления EDFA

В спектральном распределении коэффициента усиления EDFA имеется широкий максимум на длине волны 1535 нм и относительно ровная область между 1540 нм и 1560 нм. Эта узкая область шириной около 20 нм и является рабочим диапазоном усилителя EDFA, в пределах которого должны лежать длины волн всех каналов систем DWDM.

Было предложено множество методов, позволяющих выровнять спектр усиления и расширить рабочий диапазон усилителя EDFA до 40 нм и более. Ровный спектр усиления необходим для того, чтобы при прохождении последовательно расположенных по линии связи усилителей EDFA происходило равномерное усиление сигналов с различными длинами волн. В усилителе LWEDFA, описанном выше, верхняя граница рабочего диапазона достигает 1610 нм. Это позволяет передавать каналы DWDM в обоих направлениях в двух взаимно не пересекающихся окнах и в тоже время снижает уровень технических требований при более плотной упаковке каналов DWDM.

В современных усилителях EDFA имеется ряд компонентов, которые увеличивают их надежность. Изоляторы подавляют обратное распространение усиленной спонтанной эмиссии ASE и предохраняют усилитель от попадания всевозможных отраженных сигналов и излучения накачки от EDFA, расположенных ниже по линии связи. Устройства компенсации дисперсии выравнивают временные задержки, возникающие при распространении сигналов различных длин волн, особенно между двумя каскадами двухкаскадного EDFA (рис. 2.22-d).

В современных EDFA используется волокно на кварцевой или фторидной основе. Применение других материалов пока находится в стадии исследования. Оба типа волокна имеют практически одинаковую внутреннюю структуру, но волокно на фторидной основе обеспечивает более высокий уровень легирования эрбием. Обе технологии обеспечивают приемлемое усиление в окне 1525-1560 нм, однако, спектральное распределение коэффициента усиления для усилителей EDFA на кварцевой основе менее однородное, чем для усилителей на фторидной основе (см. рис. 2.25).

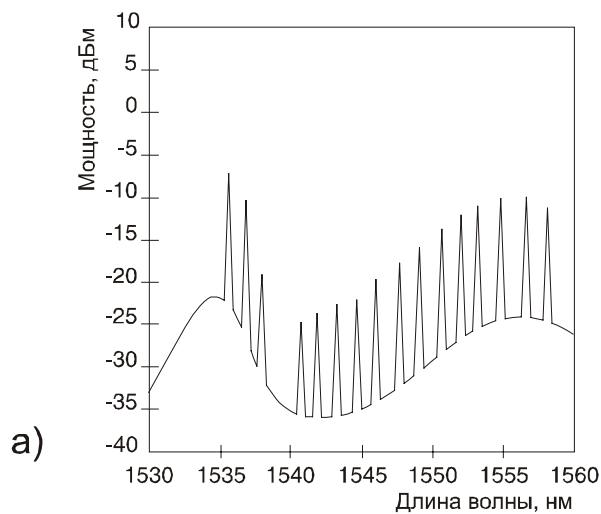


Рис. 2.25-а Спектральное распределение коэффициента усиления EDFA на кварцевой основе

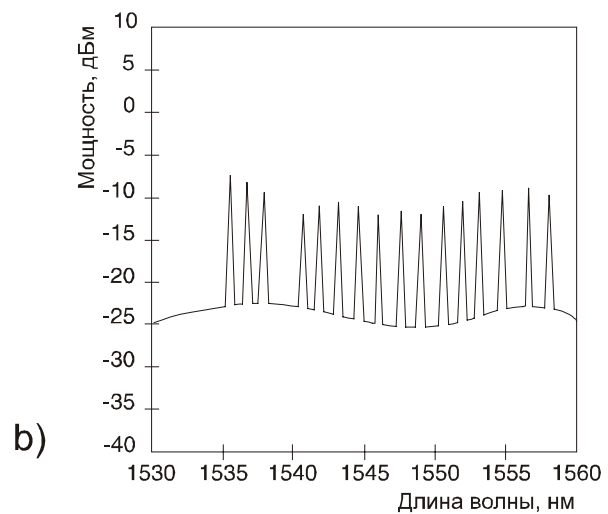


Рис. 2.25-б Спектральное распределение коэффициента усиления EDFA на фторидной основе

Усилители EDFA на кварцевой основе раньше появились на рынке и получили более широкое распространение благодаря низкому коэффициенту шума и широкому рабочему диапазону. Усилители EDFA на фторидной основе имеют несколько более широкий рабочий диапазон и намного более равномерное спектральное распределение коэффициента усиления, но при этом обладают и более высоким уровнем шума.

Другие методы усиления оптических сигналов

Помимо EDFA, имеются и другие варианты оптических усилителей. Альтернативные разработки направлены как на расширение или смещение рабочего диапазона, так и на упрощение конструкции и, соответственно, уменьшение стоимости оптических усилителей.

Один из подходов заключается в использовании в качестве легирующей добавки не эрбия, а празеодима. Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном празеодимом PDFFA (Praseodymium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) усиливает сигналы в области длины волны 1310 нм. Усилители PDFFA обладают низкой дисторсией и низким уровнем коэффициента шума, но энергетически менее эффективны, чем усилители EDFA. Мощность выходного сигнала усилителя PDFFA в режиме насыщения достаточно высока, а коэффициент его усиления не зависит от поляризации, также как и у усилителя EDFA. Хотя затухание сигнала в оптическом волокне в области длины волны 1310 нм несколько выше, чем в области длины волны 1550 нм, (см. рис. 2.26), дисперсия в области длины волны 1310 нм ниже и достичь высокой мощности лазера намного легче.

К сожалению, приемлемая эффективность накачки для волокна, легированного празеодимом, достигается только тогда, когда его диаметр значительно меньше диаметра стандартного волокна. Из-за разности диаметров волокон на обоих стыках возникают оптические потери. Достаточно сложно обеспечить механическую надежность стыков. В настоящее время нет экономичных способов решения этих

ОСНОВЫ

проблем, а потому возможность широкого коммерческого использования усилителей PDFFA пока исключена.

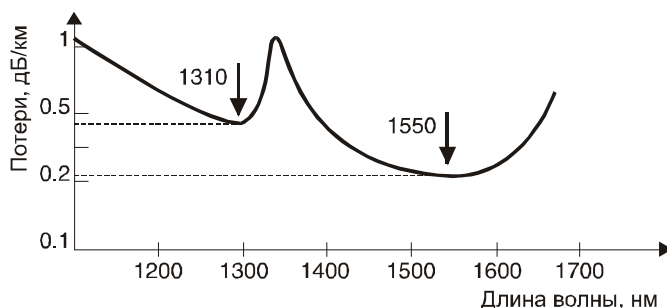


Рис. 2.26. Спектральное распределение коэффициента затухания для стандартного одномодового волокна

Другая комбинация, которая исследуется в настоящий момент – волокно и тулий. Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном тулием TDFFA (Thulium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) имеет два рабочих диапазона: в области длины волны 1460 нм и в области длины волны 1650 нм. К его преимуществам относятся высокая мощность выходного сигнала в режиме насыщения, не зависящий от поляризации коэффициент усиления и низкий коэффициент шума. В усилителях с очень высокой мощностью выходного сигнала в качестве легирующей примеси используется также иттербий.

Несколько другое направление исследований – усиление за счет стимулированного эффекта рассеяния Рамана (также известного как вынужденное комбинационное рассеяние) в обычном кварцевом волокне. Этот метод в силу своей природы обладает низким шумом и обеспечивает широкий выбор рабочего диапазона длин волн. Рамановские усилители (Raman amplifiers) позволяют увеличивать число каналов в существующих линиях связи без замены уже установленных EDFA. Они могут успешно применяться в подводных линиях средней протяженности без повторителей (длиной около 300 км), где установка усилителей EDFA требует больших затрат. Однако в рамановских усилителях при усилении возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что ограничивает применение таких усилителей либо одноканальными системами, либо системами DWDM с очень большим числом каналов, где влияние такой модуляции устраняется за счет усреднения. Кроме того, рамановские усилители имеют определенные недостатки, связанные с нелинейными эффектами и зависимостью от поляризации. С учетом низкого уровня преобразования сигнала в эффекте рассеяния Рамана в кварцевом волокне, их применение ограничено узким кругом специфических областей, по крайней мере, на данный момент.

В настоящее время разрабатываются также полупроводниковые оптические усилители SOA (Semiconductor Optical Amplifiers). В них излучение фотонов стимулируется рекомбинацией электронов и дырок в полупроводнике посредством прямой инжекции тока (а не внешней накачкой оптическим излучением, как в случае волокна, легированного эрбием). Такие усилители представляют значительный интерес, поскольку позволяют достичь высокой эффективности усиления и гибкости рабочей длины волны, пусть и с достаточно высоким коэффициентом шума (обычно на 5-6 дБ больше, чем у EDFA, в основном за счет неизбежных потерь на стыке активного слоя с волокном). Как и в рамановских усилителях, в SOA возникает значительная

перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что препятствует их применению в системах DWDM с небольшим числом каналов. Однако, эта же перекрестная модуляция может стать преимуществом при использовании усилителей SOA для коммутации или преобразования длин волн.

Для усилителей SOA, как и для PDFFA, возникает проблема стыковки с волокном, поскольку толщина активного слоя полупроводникового усилителя значительно отличается от диаметра сердцевины стандартного оптического волокна.

В настоящее время становятся доступны модуляторы с высокими скоростями модуляции, использующие интегральную оптику. Имеются модуляторы, встроенные в один модуль с лазером. Скоро должны появиться модули, которые объединят в себе несколько лазеров, соответствующее количество модуляторов и усилителей SOA и мультиплексор.

2.5.11 Оптическое волокно

Стандартное волокно

Оптическое волокно, уложенное в кабель, является одним из важнейших компонентов волоконно-оптической сети. Волокно – та физическая среда, по которой осуществляется передача информации. Первые волокна, которые стали широко использоваться на линиях связи большой протяженности – одномодовые волокна со ступенчатым показателем преломления и нулевой дисперсией на длине волны 1310 нм (G.652 по классификации ITU), стандартные одномодовые волокна. В 1980-е годы было проложено более 80 миллионов километров кабеля с такими волокнами. Несмотря на рост скоростей передачи данных и появление технологии DWDM, позволяющей во много раз увеличить пропускную способность уже проложенного кабеля, интенсивность прокладки кабеля во всем мире в обозримом будущем не упадет.

Хотя стандартное волокно G.652 имеет нулевую хроматическую дисперсию на длине волны 1310 нм, его дисперсия на длине волны 1550 нм достаточно высока (18 пс/нм*км). На первый взгляд, это несовместимо с рабочим диапазоном EDFA (область 1550 нм). Однако недавние исследования показали, что передача каналов DWDM умеренной скорости по волокну G.652 может происходить на значительные расстояния без потери качества сигнала. Во многом это достигается за счет того, что высокая дисперсия на длине волны 1550 нм может быть компенсирована с помощью отрезка специального волокна или других устройств компенсации дисперсии.

Волокно со смещенной дисперсией

Производители волокна разработали волокно со смещенной дисперсией (G.653 по классификации ITU), которое имеет нулевую дисперсию на длине волны около 1550 нм. На этой длине волны затухание ниже, чем на 1310 нм, а потому работа в окне 1550 нм более предпочтительна, особенно для линий связи большой протяженности. Однако, волокно со смещенной дисперсией не является безусловно лучшим для передачи каналов DWDM. Показатель дисперсии достаточно резко изменяется при отдалении от длины волны нулевой дисперсии, из-за чего приходится отдельно компенсировать дисперсию каждого канала.

ОСНОВЫ

Волокно с смещенной дисперсией оказалось неудачным при передаче составного сигнала DWDM. При передаче по каналу связи составного сигнала DWDM необходимо вводить в волокно сигнал очень большой мощности, из-за чего в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты. В волокне со смещенной дисперсией влияние эффекта четырехволнового смешения FWM ограничивает использование длин волн, близких к длине волны нулевой дисперсии 1550 нм. Следует отметить, что эффект FWM можно уменьшить, если передавать составной сигнал DWDM на длинах волн, достаточно удаленных от длины волны 1550 нм в одну или другую сторону. Однако, при этом становится невозможно использовать любые длины волн из частотного плана ITU.

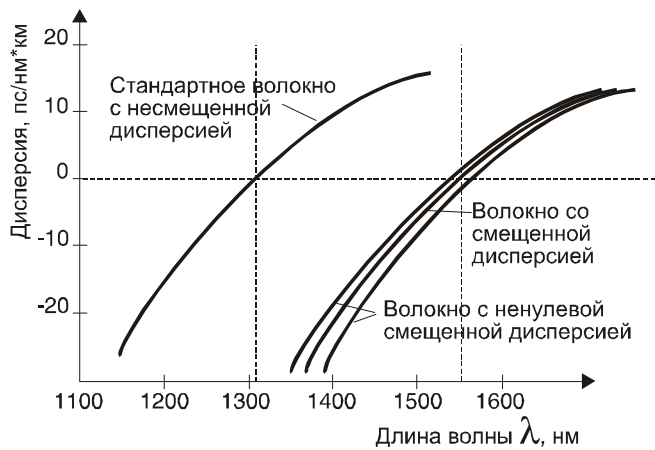


Рис. 2.27. Типичные значения дисперсии для различных типов оптических волокон

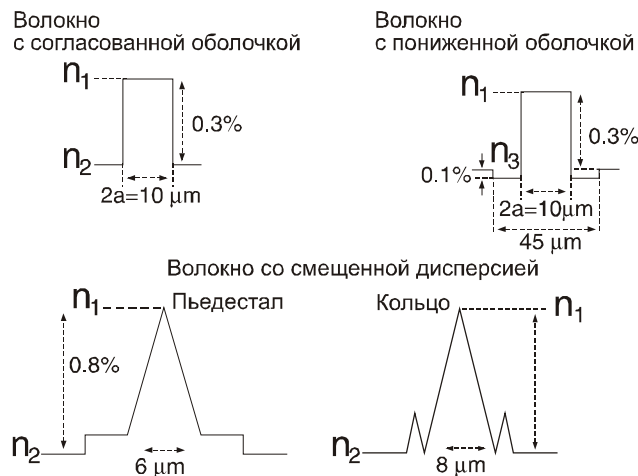


Рис. 2.28. Типичные профили коэффициента преломления для одномодовых оптических волокон

Волокно с ненулевой смещенной дисперсией

Для подавления нелинейных эффектов, и особенно FWM, были разработаны волокна, в которых длина волны нулевой дисперсии выведена из рабочего диапазона усилителей EDFA (1530-1565 нм) за счет специальных профилей показателя преломления (рис. 2.28) – волокна с ненулевой смещенной дисперсией (G.655 по классификации ITU). В пределах рабочего диапазона EDFA волокно G.655 имеет небольшую, хорошо контролируемую хроматическую дисперсию (от более чем 3 пс/нм*км на 1530 нм до менее чем 0,7 пс/нм*км на 1560 нм). Такого значения дисперсии вполне достаточно,

чтобы подавить FWM – при этом еще возможна передача со скоростью по меньшей мере 2,5 Гбит/с на канал на расстояния порядка 1000 км. Волокна G.655 наилучшим образом подходят для использования в системах DWDM.

Для нейтрализации эффекта FWM можно также увеличивать промежутки между каналами DWDM или использовать неравномерные промежутки. Однако, это вносит ограничения на использование длин волн из частотного плана ITU.

Волокна с большим эффективным сечением

Дальнейшее подавление нелинейных эффектов возможно за счет увеличения эффективной площади сечения сердцевины волокна, в которой сосредоточена основная часть мощности сигнала, при сохранении одномодового режима распространения света. Дело в том, что нелинейные эффекты зависят не от полной мощности сигнала, а от его интенсивности – то есть мощности, приходящейся на единицу площади эффективного поперечного сечения волокна.

2.6 СРАВНЕНИЕ WDM И TDM

Обе технологии WDM и TDM применяются для увеличения информационной пропускной способности сети. Хотя они не исключают, а скорее дополняют друг друга, можно сравнить такие их характеристики, как гибкость структуры линий связи, скорость передачи и влияние на относительный уровень ошибок по битам.

2.6.1 Гибкость структуры линий связи

В принципе, технология TDM дает возможность передачи по линии связи каналов, разнородных по типу передаваемых данных. Технология TDM позволяет разделить волоконно-оптический кабель на множество каналов, по которым с различными скоростями передаются различные типы трафика. Возможны различные способы распределения тайм-слотов. Они могут быть постоянно закреплены за определенными приложениями или выделяться по требованию DAMA (Demand Assignment Multiple Access). Можно изменять продолжительность тайм-слотов или полностью их исключить. В последнем случае данные передаются в виде отдельных пакетов, каждый из которых включает адрес источника и отправителя статистическое мультиплексирование). Несмотря на все эти возможности, технология TDM работает лучше всего, когда по всем логическим каналам передается один тип трафика, а все тайм-слоты имеют одинаковую продолжительность и постоянно закреплены за отдельными каналами. Этот вариант технологии TDM достаточно прост в реализации и управлении, и его эксплуатационные издержки также меньше.

В технологии WDM каналы полностью независимы, а потому она дает большую гибкость, чем технология TDM. Технология WDM позволяет без каких-либо трудностей передавать по линии связи множество каналов, тип трафика и скорость передачи данных в каждом из которых может существенно различаться. По различным каналам WDM в одном волокне может передаваться трафик Ethernet (10/100/1000 Мбит/с), цифровое видео и тестовые сигналы, и эта система будет легко управляться. Добавление новых каналов в существующую систему WDM не вызывает проблем и не требует заново распределять все тайм-слоты, как в технологии TDM.

2.6.2 Скорость передачи

В технологии TDM пропускная способность увеличивается за счет увеличения скорости передачи битов в линии связи. Насколько быстрой может быть сделана эта скорость – в пределах определенных фундаментальных ограничений оптического волокна – зависит от используемых электронных компонентов. Чтобы получать данные от каждого источника, хранить их, передавать в течение соответствующих тайм-слотов, считывать и корректно доставлять получателю, требуется применение цифровых интегральных схем. Все эти цифровые компоненты должны работать со скоростью, равной или близкой к суммарной скорости передачи линии связи. То есть, для каждого канала, независимо от его пропускной способности, должно быть установлено электронное оборудование, способное поддерживать полную пропускную способность линии связи.

Оптическое волокно позволяет передавать данные со скоростью в несколько Тбит/с, в то время как коммерчески доступные цифровые электронные устройства в настоящее время выполняют лишь порядка 1 миллиарда операций в секунду (1 Гбит/с). Несмотря на то, что быстродействие электронных устройств продолжает расти, технология TDM всегда будет иметь экономические ограничения из-за необходимости установки на каждый канал самого современного оборудования. Едва ли с помощью технологии TDM когда-либо будет достигнута суммарная скорость передачи по линии связи, соизмеримая с огромной пропускной способностью волоконно-оптического кабеля. Это ограничение касается как глобальных, так и локальных сетей передачи данных.

Хотя к окончательному электронному оборудованию для отдельных каналов WDM и предъявляются определенные требования, как и в системах TDM, все остальное оборудование в канале может поддерживать только скорость передачи по этому каналу, а не полную скорость составного сигнала. Таким образом, полная пропускная способность линии связи не ограничена скоростью работы используемых электронных устройств. При необходимости, полную пропускную способность можно увеличить в любой момент, просто добавив в существующую систему WDM несколько каналов. Самую быструю линию связи TDM, которую только можно создать с использованием наиболее современной техники, в системе WDM можно передавать как один из многих каналов. Технология WDM позволяет достичь суммарной скорости передачи по линии связи, которая сопоставима с огромной пропускной способностью, предоставляемой оптическим волокном.

В этой главе мы рассказали об основных элементах, из которых строятся системы DWDM, а также описали, как совместное использование технологий TDM и DWDM позволяет во много раз увеличить пропускную способность линии связи. С разработкой и появлением систем DWDM возникли и новые методы тестирования и контроля, позволяющие убедиться, что каждый компонент и набор компонентов работают корректно и обеспечивают заданные характеристики. В следующей главе мы опишем те параметры компонентов, контроль которых наиболее важен, после чего перейдем к подробному рассмотрению методов тестирования в главе 4.

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 3

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

3.1 ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Появление технологии DWDM, как и любой новой технологии, одновременно со значительными преимуществами принесло и новые проблемы. Основной проблемой для операторов современных систем DWDM является их надежная и стабильная работа. Очень важным становится контроль качества оптических характеристик и поведения системы, начиная от производства компонентов и завершая этапом системной интеграции. Такой контроль гарантирует ввод системы DWDM в эксплуатацию с расчетными параметрами и длительную и устойчивую ее работу.

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие производительность систем с временным мультиплексированием TDM, поместив их на плоскости параметров время-мощность, рис. 3.1.

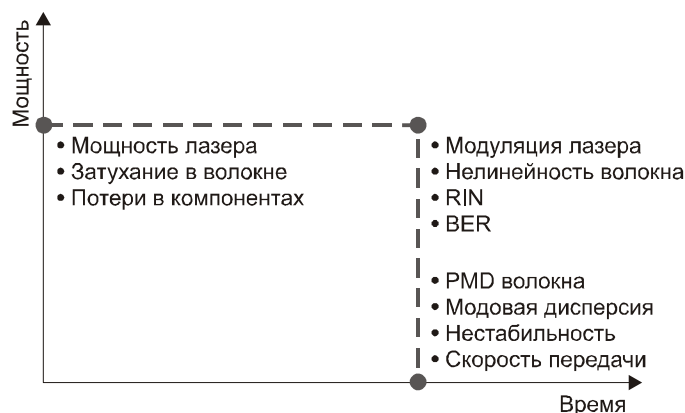


Рис. 3.1 Основные факторы, ограничивающие характеристики систем TDM

По оси мощности отложены такие параметры как мощность лазера, потери в волокне и потери, вносимые компонентами. Вдоль другой оси отложены параметры, связанные со временем. Это – поляризационная модовая дисперсия PMD волокна, хроматическая и модовая (для многомодовых волокон) дисперсия, а также нестабильность сигнала и скорость передачи. На пересечении осей появляются новые параметры, требующие учета: глубина модуляции лазера, нелинейность волокна, относительная интенсивность шума RIN (Relative Intensity Noise) и коэффициент ошибок BER (Bit Error Rate).

Мультиплексирование по длине волны добавляет в пространство параметров новое измерение – длину волны – и намного усложняет представление основных параметров систем WDM, рис. 3.2.

Вдоль оси длин волн отложены следующие параметры: стабильность спектра, спектральный диапазон усилителя EDFA, центральная длина волны и ширина полосы пропускания. На пересечении параметров времени и длины волны располагаются: девиация частоты (чирпирование) лазера, хроматическая дисперсия, стабильность оптической частоты и фазовые шумы (фазовая автомодуляция и перекрестная фазовая модуляция). Совместное же влияние длины волны и мощности проявляется в таких явлениях, как: усиленное спонтанное излучение ASE, усиление EDFA, перекрестные помехи, четырехволновое смешение FWM и вынужденное комбинационное рассеяние (рассеяние Рамана). И, наконец, картину завершает вынужденное рассеяние Бриллюэна-Мандельштама, рис. 3.2). Хотя технология WDM и повышает эффективность сетей, увеличивая полосу пропускания и количество каналов, ее применение требует тща-

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

тельной подготовки. На этапах планирования, разработки, производства и ввода систем WDM в эксплуатацию, все эти факторы должны быть рассмотрены и учтены в должной мере.

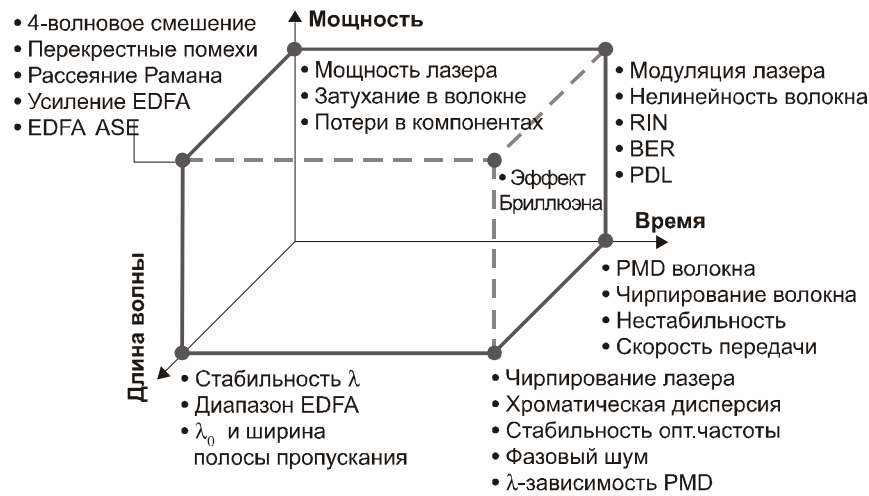


Рис. 3.2 Системы WDM добавляют длину волны - новое измерение в пространстве параметров

Далее будут рассмотрены наиболее важные параметры и свойства волокна, а также других оптических компонентов, включая активные компоненты системы WDM.

3.2 МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ И ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ

Мультиплексор MUX используется для объединения в одном оптическом волокне нескольких каналов с разными длинами волн, рис. 3.3. В качестве мультиплексора можно использовать широкополосный разветвитель. Однако вносимые при этом потери были бы слишком велики – до 4 дБ для двухканальных систем, 7 дБ для четырехканальных, 13 дБ для 16-тиканальных и т.д. Поэтому для мультиплексирования входных каналов обычно используют другие методы, основанные на применении оптических фильтров. Существующие узкополосные мультиплексоры DWDM объединяют каналы с разными длинами волн в один общий оптический канал с минимально возможными потерями.

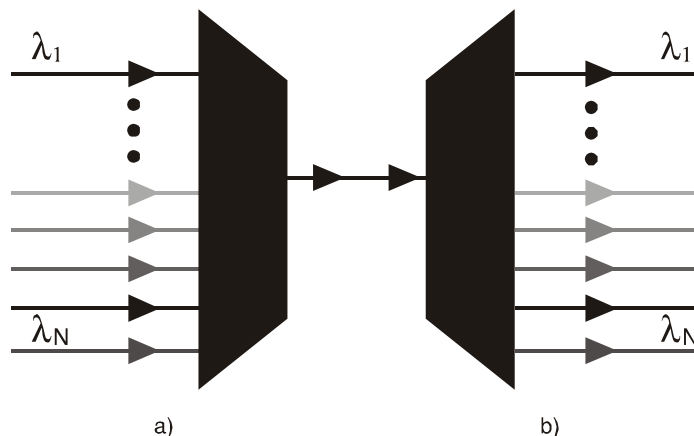


Рис. 3.3 Мультиплексируемые длины волн должны быть точно заданы с равномерными интервалами

Демультимплексор DEMUX напротив разделяет составной канал на отдельные каналы. Хотя технологии, используемые при изготовлении демультимплексоров и мультиплексоров, схожи, изготовление демультимплексоров представляется более сложной задачей. Дело в том, что DEMUX в большей степени характеризуется параметром, который называется изоляцией, в то время как MUX – направленностью (параметры далее определяются). Чем меньше значение каждого из параметров, тем выше характеристики устройства. Технологически наиболее трудно изготавливать устройства с низким значением изоляции. Таким образом, любой DEMUX обычно может работать в режиме мультиплексирования, обратное вообще говоря не верно. По мере уменьшения интервала между каналами и увеличения числа каналов изготовление демультимплексора становится технологически более сложной задачей.

3.2.1 Полоса пропускания канала

Эффективность мультиплексора/демультимплексора определяется его способностью изолировать друг от друга входные или выходные каналы. Полоса пропускания каждого канала характеризуется параметрами, представленными на рис. 3.4. К ним относятся:

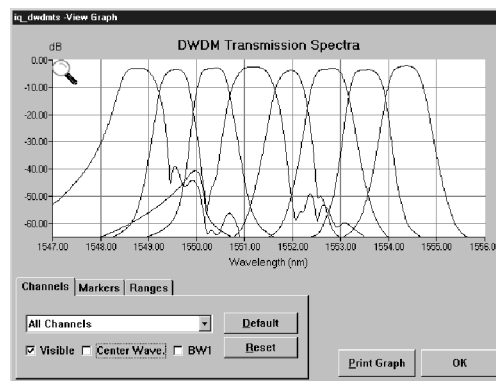


Рис. 3.4 Критерии эффективности для типичного мультиплексора/демультимплексора

1. Центральная длина волны канала

Центральная длина волны - один из параметров, характеризующих канал мультиплексора/демультимплексора. Центральная длина волны канала – это среднее арифметическое значение верхней и нижней длины волны отсечки: $\lambda_{upper} + \lambda_{lower} / 2$. Длины волн отсечки – верхняя и нижняя – это длины волн, на которых вносимые потери достигают заданного уровня (обычно 3 дБ). Центральная длина волны может не совпадать с длиной волны спектрального максимума..

Центральная длина волны канала является наиболее важным параметром для оптических фильтров с симметричной (или близкой к ней) формой спектра. Для идеального симметричного спектра оптического канала центральная длина волны совпадет с длиной волны спектрального максимума, что наблюдается крайне редко. Для более сложной спектральной кривой с несколькими пиками длины волн отсечки определяются на “крыльях” кривой. Часто относительно слабые отклонения в форме спектра приводят к заметному изменению центральной длины волны – сравните два спектра на рис. 3.5.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

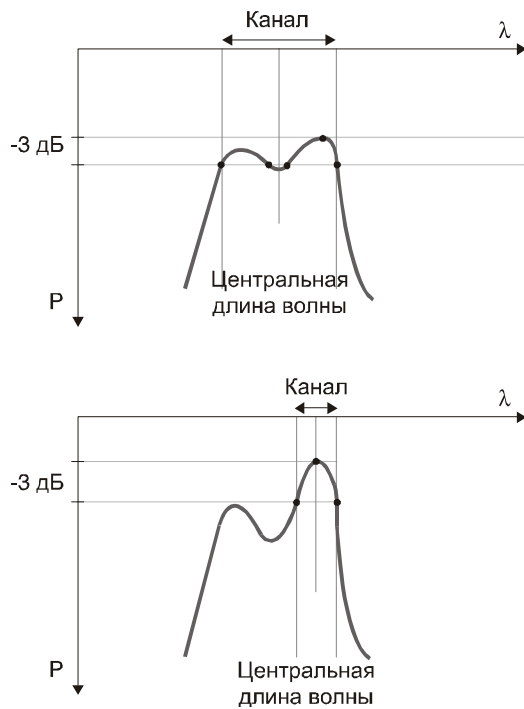


Рис. 3.5 Сравнение двух спектров, показывающих влияние слабых изменений на положение центральной длины волны

Номинальную длину волны передатчика стараются делать как можно ближе к центральной длине волны. Обычно это – одна из длин волн, соответствующих частотному плану ITU (табл. 2.2, глава 2).

2. Интервал между каналами

Интервал между каналами должен соответствовать частотному плану системы WDM. В существующих сетях используют как равномерные, так и неравномерные частотные сетки каналов. Наиболее распространенным является частотный план ITU с равномерным частотным интервалом между каналами 100 ГГц.

Неравномерные интервалы между каналами главным образом применяют для того, чтобы минимизировать или устранить нелинейный четырехволнового смещения FWM, когда в результате нелинейного взаимодействия излучения в волокне на двух и более частотах возникают сигналы с новой частотой. При равномерных интервалах между каналами новый паразитный сигнал может совпасть по частоте с существующими сигналами других каналов и тем самым привести к возникновению перекрестных помех. При неравномерных интервалах между каналами четырехволновое смещение приводит к дополнительным шумам на длинах волн, не используемых для передачи полезного сигнала.

3. Полоса пропускания по уровню -3 дБ (и другим пороговым уровням, обычно $-0,5$ дБ, -20 дБ или ниже)

Полоса пропускания – это та часть спектра передаваемого сигнала (или отраженного сигнала для таких устройств, как, например, брэгговская дифракционная решетка), в пределах которой все спектральные составляющие превышают некоторый пороговый уровень. Например, можно задать порог по уровню -3 дБ от максимума или ширину на половине высоты FWHM (Full Width at Half Maximum). Бессмысленно говорить о ширине полосы пропускания без указания порогового уровня. Полоса пропускания определяет тот спектральный диапазон, в пределах которого устройство может быть эффективно использовано.

Определение полосы пропускания при двух и более пороговых уровнях позволяет показать ее форму на краях, которая обычно зависит от порядка используемого фильтра, рис. 3.6. Значения ширины полосы пропускания при очень большом затухании (-20 дБ или -30 дБ) полезны для прогнозирования уровня возможных перекрестных помех в соседних каналах систем DWDM. Конкретное пороговое значение ширины полосы пропускания зависит от степени изоляции соседних каналов, необходимой для отдельных сетевых приложений.

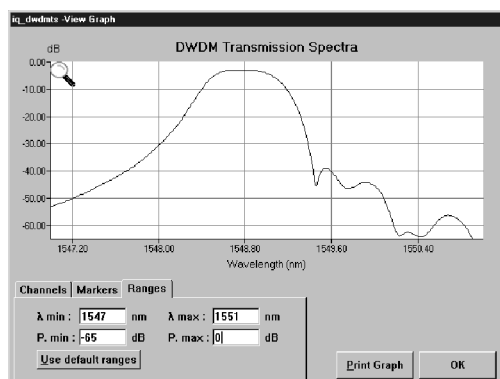


Рис. 3.6 Измерение полосы пропускания широкополосного сигнала

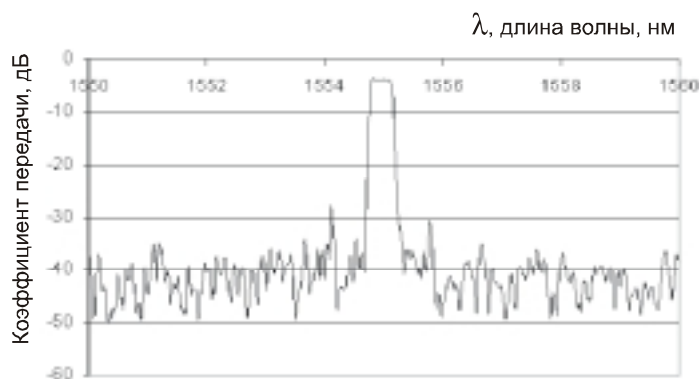


Рис. 3.7 Измерение полосы пропускания узкополосного сигнала

Полоса пропускания всех компонентов (и их составляющих в случае мультиплексоров) очень важна для определения допустимого разнесения каналов и характеристик лазера.

Некоторые производители для описания формы полосы пропускания фильтра используют критерий качества FOM (Figure of Merit), который определяется как отношение ширины полосы пропускания к ширине полосы отражения. Для фильтра с идеальной прямоугольной частотной характеристикой это отношение равно единице. В общем случае, чем выше порядок фильтра, тем круче передаточная характеристика и, следовательно, тем больше критерий качества.

4. Изоляция и дальние перекрестные помехи FEXT (Far-End Crosstalk)

Рассмотрим работу демультиплексора, а именно один из его выходных каналов с центральной длиной волны λ_i . Большая часть излучения на этой длине волны идет по этому каналу – полезный сигнал. Однако часть излучения на этой длине волны может также присутствовать и в других выходных каналах (в соседних каналах обычно наибольшая мощность) в качестве паразитного сигнала.

В общем случае изоляция канала и перекрестные помехи определяют уровень ослабления сигнала данного канала в других каналах, где этот сигнал не является основным. При измерении ослабленной доли сигнала, который в идеальном работающем компоненте вообще должен отсутствовать, принимают во внимание характеристики полосы пропускания каждого канала и обычно указывают значения при наихудших условиях. Хотя нет общепринятых строгих определений изоляции и перекрестных помех, эти понятия несколько различаются между собой. Изоляция (измеряется в дБ) определяется как минимальная величина ослабления мощности сигнала с выборкой по всем неосновным выходным каналам по отношению к основному входному каналу. Для канала i с центральной длиной волны λ_i изоляцию можно определить по формуле:

$$Isolation_i = \min_{j \neq i} 10 \lg \frac{P_{in i}(\lambda_i)}{P_{out j}(\lambda_i)},$$

где $P_{in i}(\lambda_i)$ – мощность входного сигнала на длине волны λ_i , $P_{out j}(\lambda_i)$ – мощность сигнала на длине волны λ_i , присутствующего в канале j (j не совпадает с i).

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

Так, изоляция в 30 дБ означает, что уровень сигнала в каждом из соседних каналах на длине волны основного канала ниже уровня сигнала основного канала на этой длине волны как минимум на 30 дБ.

Перекрестные помехи также измеряются в дБ и определяют превышение уровня мощности входного сигнала на длине волны λ_i на всей суммарной утекающей мощностью этого сигнала в неосновные каналы:

$$Crosstalk_i = 10 \lg \left[\frac{P_{in_i}(\lambda_i)}{\sum_{j \neq i} P_{out_j}(\lambda_i)} \right]$$

На рис. 3.8 изображены спектры потерь для трех каналов А, В и С. Там же показан рабочий диапазон длин волн канала В; передатчик канала В может работать на любой длине волны в этом диапазоне. При измерении изоляции канала В определяют долю мощности канала В, которая попадет в канал А. Совместив спектры потерь для этих каналов, можно определить значение изоляции в дБ. Обычно такой расчет выполняют для наихудшего случая, соответствующего в данном случае краю полосы (обычная ситуация для тонкопленочных устройств). Для указанного выше типа устройств изоляция любых двух несмежных каналов очень высока, и, соответственно, их перекрестными помехами можно пренебречь. Однако для некоторых технологий с применением решетки на основе массива волноводов AWG, это может оказаться неверным.

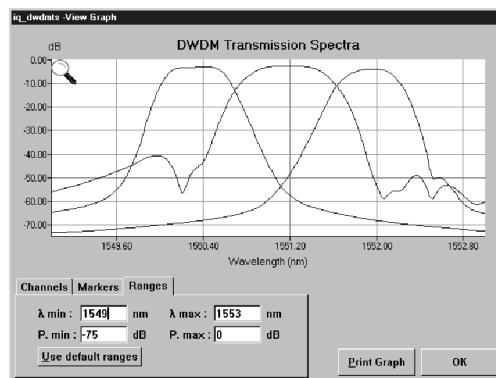


Рис. 3.8 Спектр потерь 3-х канального устройства

На рис. 3.9 представлены спектры потерь 8-канальной волноводной решетки. Кривые полосы пропускания и полосы подавления совершенно отличаются от спектральных кривых, ранее рассматриваемых тонкопленочных устройств. Наихудшая изоляция не обязательно проявляется на краях полос, а уровень изоляции несмежных каналов может оказаться ниже, чем для смежных каналов. При этом в многоканальных системах уровень изоляции следует представлять в матричной форме, позволяющей задавать влияние каждого канала на все остальные и оценивать полные перекрестные помехи.

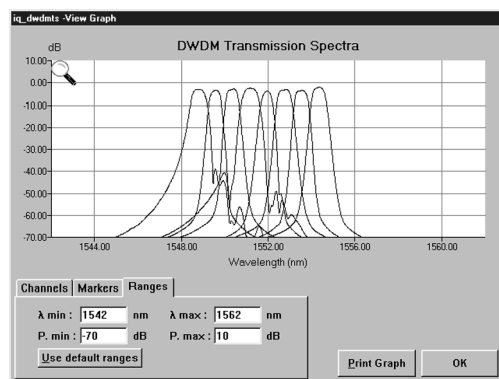


Рис. 3.9 Характеристики изоляции и перекрестных помех 8-канальной волноводной решетки

Помимо измерения или оценки уровня наихудших перекрестных потерь между каналами в системе WDM, также необходимо определять допустимые их уровни. Изоляция смежных каналов на уровне 25 дБ и выше традиционно считается вполне достаточной. В тоже время сети становятся все сложнее, а приемники должны надежно различать все более слабые сигналы. Поэтому уровень изоляции каналов необходимо повышать. По тем же причинам, уровень изоляции несмежных каналов, считавшийся ранее пренебрежимо малым, должен быть принят во внимание при проектировании новых сетей.

5. Неравномерность пика мощности в спектре канала (вариации мощности в окрестности максимума полосы пропускания, рис. 3.10)

При более внимательном рассмотрении спектральная чувствительность DWDM-устройств никогда не является идеально равномерной. Пиковое значение вносимых потерь характеризует уровень потерь на фиксированной длине волны, но не определяет полностью разброс уровней потерь во всей полосе пропускания или в отдельном канале. Разброс уровней потерь – разность между минимальным и максимальным уровнями потерь в измеренной или номинальной полосе пропускания – называют неравномерностью распределения потерь. Для описания этого же параметра часто используют обратную характеристику – равномерность распределения потерь.

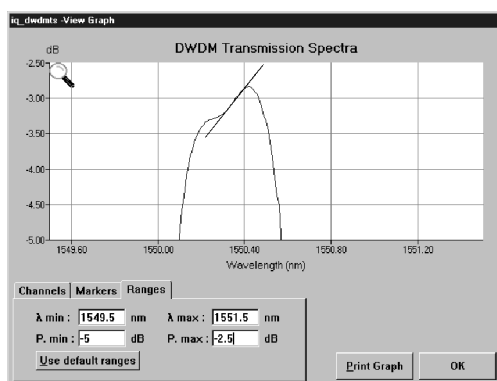


Рис. 3.10 Увеличенная часть спектра канала мультиплексора. Видна неравномерность вблизи максимума спектральной характеристики

Неравномерность распределения потерь канала предоставляет разработчику системы информацию о возможном разбросе уровня передаваемой мощности при изменении длины волны передатчика в пределах номинальной полосы пропускания, рис. 3.10. Большая неравномерность распределения потерь неприемлема во многих практических приложениях.

Другой важный для разработчиков параметр – максимальная крутизна неравномерности распределения потерь. Крутизна показывает локальное изменение уровня потерь (мощности канала) при изменении длины волны передатчика ($\delta loss/\delta\lambda$). В некоторых случаях и полные вносимые потери, и полный разброс вносимых потерь устройства могут быть вполне приемлемы, но небольшая локальная неравномерность распределения потерь может сделать устройство непригодным для применения в конкретном DWDM-приложении.

6. Однородность каналов

Однородность каналов является мерой разброса уровня передаваемой мощности или вносимых потерь от канала к каналу в мультиплексоре/демультиплексоре.

3.2.2 Поляризационные явления

Состояние поляризации оптического излучения в произвольной точке волоконно-оптической сети никогда не бывает точно известно. Оно зависит от геометрического пути волокна, характера двулучепреломления вследствие асимметрии показателя преломления и множества других оптических явлений в компонентах линии связи. Двулучепреломление среды передачи может быть неотъемлемым свойством материала волокна или вызвано его растяжением, сжатием и тепловыми напряжениями.

Так как характеристики многих компонентов, обычно используемых в волоконно-оптических сетях, зависят от состояния поляризации света, то и общие характеристики канала, такие как вносимые потери, центральная длина волны и полоса пропускания также зависят от поляризации. Поэтому, чтобы гарантировать достоверность характеристик сети, разработчик должен принять во внимание наихудший случай поляризационной зависимости всех пассивных компонентов, используемых в системе.

Потери, ширина полосы пропускания и центральная частота – все эти параметры в какой-то мере чувствительны к состоянию поляризации оптического излучения. Каждый из перечисленных параметров должен быть измерен для различных состояний поляризации, задаваемых с помощью калиброванного поляризатора. Величина разброса полученных результатов называется поляризационной зависимостью измеряемого параметра. В идеале измерения следует провести для всех возможных состояний поляризации, но обычно ограничиваются случайным выбором нескольких состояний поляризации. Далее описываются три основные методики измерений.

Потери, зависящие от поляризации PDL

Потери, зависящие от поляризации PDL (Polarization Dependent Loss) определяются как вариации уровней потерь по всему множеству возможных состояний поляризации. Их получают из отношения мощности передаваемых сигналов для лучшего и худшего состояний поляризации (рис. 3.11) и обычно выражают в дБ. Наихудший случай потерь в компоненте для заданной длины волны (обычно это номинальная рабочая длина волны) получается, если половину потерь PDL добавить к вносимым потерям, измеренным для случая неполяризованного излучения.

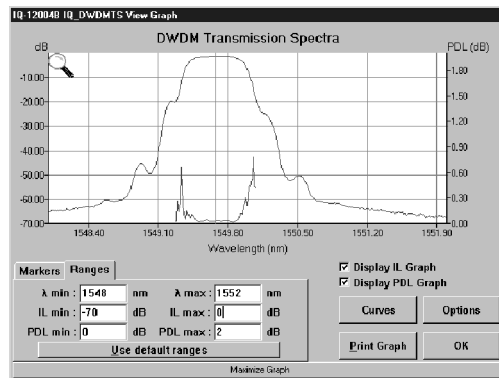


Рис. 3.11 Зависимость вносимых потерь от поляризации для типичного мультиплексо-ра/демультиплексо-ра

В общем случае потери PDL имеют наименьшее значение в полосе пропускания, более высокое в переходной области на краях полосы пропускания, и наивысшее вне полосы пропускания фильтра. Большинство производителей компонентов и потребителей считают достаточным проводить измерения потерь PDL для центральной длины волны канала и на краях полосы пропускания. Для большинства приложений в этих областях значение PDL не должно превышать 0,1 дБ.

Другие, зависящие от поляризации характеристики мультиплексо-ра, такие как центральная длина волны и ширина полосы пропускания (рис. 3.12), оцениваются по той же методике, что и потери PDL.

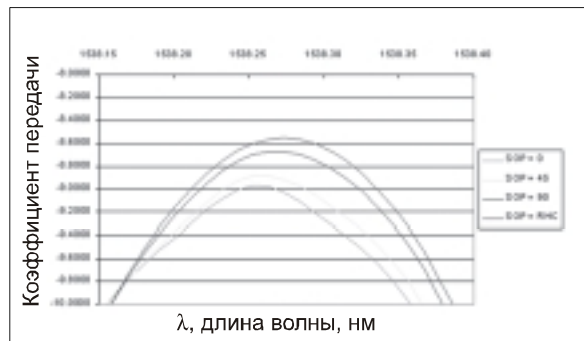


Рис. 3.12 Поляризационная зависимость центральной длины волны для типичного мультиплексо-ра/демультиплексо-ра

Поляризационная модовая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion) возникает из-за различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных составляющих излучения. Различие в скорости вызвано отклонениями от идеального кругового сечения волокна и как следствие различными эффективными показателями преломления для двух ортогональных направлений линейной поляризации. Таким образом, при распространении света по волокну происходит накопление разности фаз излучения с различным состоянием поляризации (рис. 3.13). Это явление, усугубляемое потерями, зависящими от поляризации PDL и чирпированием частоты передатчика, приводит к уширению импульсов излучения, влияет на относительный уровень ошибок BER в цифровых системах и может внести серьезные искажения гармоник в аналоговых системах, например, в сетях CATV. В оптической линии связи PMD обычно накапливается

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

статистически, как квадратный корень из длины пути L , а не линейно. Полное значение PMD имеет размерность времени (обычно измеряется в пс) и определяется по формуле

$$PMD = K_{PMD} \sqrt{L},$$

где K_{PMD} – коэффициент PMD (пс/км^{1/2}). Физический смысл K_{PMD} – это дисперсия PMD на длине волокна 1 км.

Поляризационную модовую дисперсию могут вносить и локальные компоненты оптической линии связи, например, оптические соединители, мультиплексоры/демультиплексоры. Для таких компонент обычно указывается изготовителем максимальное допустимое значение PMD (пс).

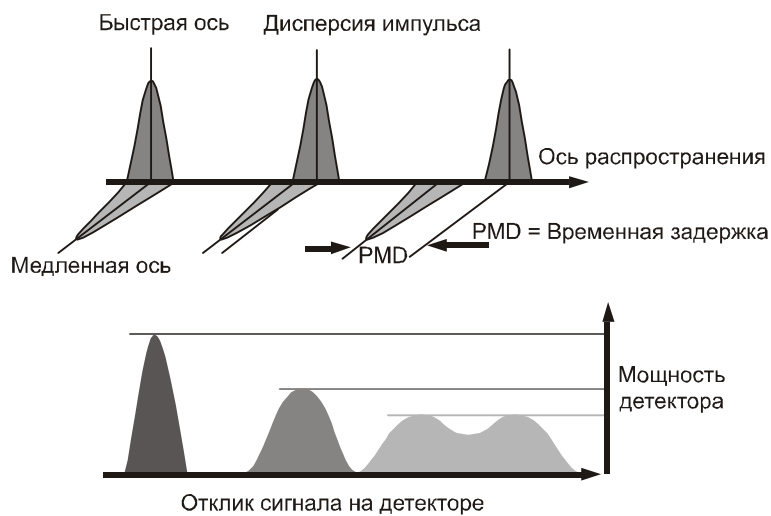


Рис. 3.13 Проявление эффекта PMD: нарастание временной задержки между быстрой и медленной составляющими сигнала и искажение формы (уширение импульса) результирующего сигнала

3.2.3 Вносимые потери

Вносимые потери IL (Insertion Loss) каким-либо компонентом системы измеряются в дБ и определяются по формуле

$$IL = 10 \lg(P_{in} / P_{out}),$$

где P_{in} и P_{out} – мощности на входе и выходе компонента системы. Вносимые потери количественно определяют потери мощности в устройстве на какой-то конкретной длине волны или в заданном спектральном диапазоне. Вносимые потери компонентов систем DWDM также характеризуют их полосу пропускания. Очевидно, что вносимые потери должны быть как можно меньше.

Для полного описания вносимых потерь DWDM-устройства требуется зависимость потерь от длины волны. На рис. 3.14 показана спектральная зависимость потерь одного из мультиплексных каналов системы DWDM в окрестности центральной длины волны канала. Там же указано точное положение центральной длины волны канала в соответ-

ствии с частотным планом ITU, а заодно и каналные допуски (перекрестия на кривой), задающие предельно допустимые значения длин волн передатчика.

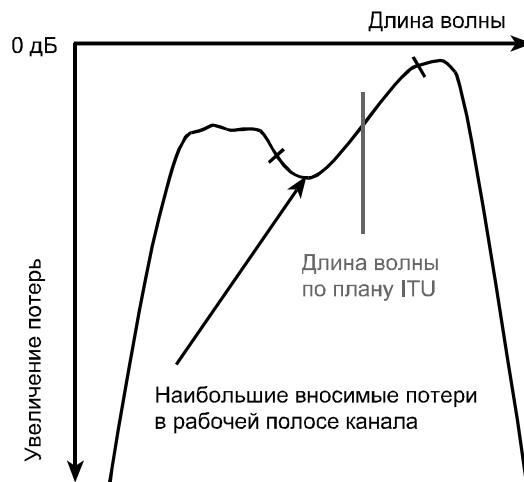


Рис. 3.14 Вносимые потери для типичного мультиплексора/демультиплексора

Наиболее полезно проведение измерений вносимых потерь на длине волны, соответствующей наибольшим потерям. Используя такие значения для компонентов, разработчик может с запасом рассчитать энергетический потенциал канала для любой длины волны. Эту методику использует большинство производителей компонентов и в качестве характеристики указывают максимальное значение вносимых потерь. Отметим, еще раз, что длина волны ITU необязательно совпадает с центром полосы пропускания.

Описанный выше метод применим при известной ширине канала. Некоторые компоненты предназначаются для широкого применения с неопределенными заранее условиями их работы. В такой ситуации, лучше всего определять вносимые устройством потери для центральной длины волны полосы пропускания. Этот метод часто используют для характеристики одноканальных устройств или устройств с симметричной полосой пропускания.

В настоящий момент не существует общепринятого стандарта определения вносимых потерь при поляризационной зависимости. Комитетом по стандартам пока предложено одно обоснованное определение. Сначала необходимо измерить вносимые потери для неполяризованного источника излучения по приведенной выше формуле. Тогда потери, зависящие от поляризации PDL, дадут разброс уровня потерь для этого значения. Существует также альтернативный метод измерения этой величины. Вносимые потери можно определить как наименьшие потери при использовании поляризованного источника излучения (например, лазера). Для их определения необходимо изменять состояние вектора поляризации на входе тестируемого компонента. Тогда для наихудшего случая полные потери могут быть определены как сумма вносимых Π и зависящих от поляризации PDL потерь.

При сравнении вносимых потерь для различных устройств, следует учитывать такие важные факторы, как влияние соединителей и равномерность распределения вносимых потерь Π между каналами в многоканальных устройствах.

3.2.4 Направленность

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

Направленность (Directivity), также используется термин ближние перекрестные помехи NEXT (Near-End Crosstalk), является мерой изоляции входных портов многопортового устройства (рис. 3.15). Это важная характеристика присуща мультиплексорам.

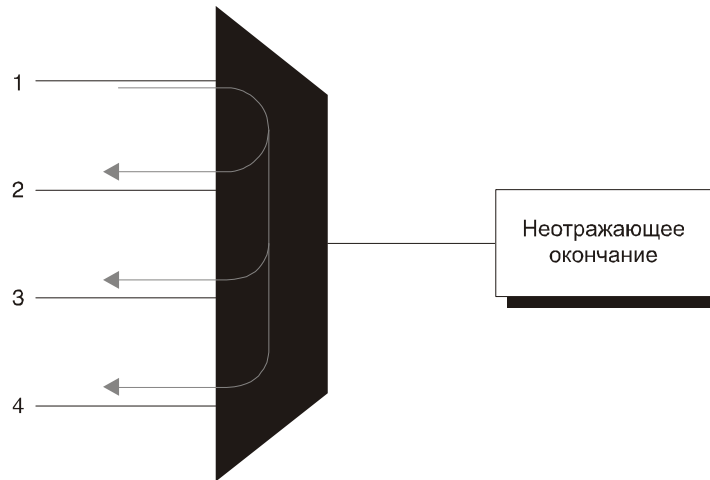


Рис. 3.15 Иллюстрация нежелательной утечки сигнала с входного порта 1 в другие входные порты

При измерении направленности необходимо обеспечить отсутствие отражений от выходной части устройства. В противном случае, отражения на концах волокон могут исказить результаты измерений.

Довольно часто измерения направленности выполняют только для номинальных длин волн каналов. На рис. 3.15 приведена схема подобного измерения. На вход канала 1 подается сигнал на заданной длине волны и измеряется мощность, возвращаемая на другие входные порты. Разность (в дБ) между введенной мощностью и возвращенной по некоторому другому входу и является направленностью для данной пары каналов. Измерения следует провести для всех возможных пар каналов. Измерения направленности трудно автоматизировать, особенно для устройств с большим количеством каналов. Направленность по отношению к i -ому входному порту определяется соотношением:

$$Directivity_i = \min_{j \neq i} 10 \lg \frac{P_{in i}(\lambda_i)}{P_{out j}(\lambda_i)},$$

где $P_{in i}(\lambda_i)$ – мощность сигнала канала λ_i , поступающего на входной порт i , $P_{out j}(\lambda_i)$ – мощность сигнала на длине волны λ_i , выходящего через другой входной порт j .

3.2.5 Потери на отражение

При вводе оптического излучения в оптический компонент (соединитель, мультиплексор или в само волокно) основная часть мощности передается по физическому каналу, какая-то часть поглощается, а какая-то часть отражается. В оптических системах излучение отражается по двум причинам: в результате рэлеевского рассеяния и френелевского отражения. Рэлеевское рассеяние возникает внутри волокна в результате неизбежного взаимодействия передаваемых световых волн с молекулами материала волокна. Поэтому рэлеевское рассеяние зависит от состава материала волокна. Оно также зависит от длины волны. Амплитуда рэлеевского рассеяния составляет около -75 дБ на метр обычного волокна на длине волны 1550 нм, и на больших расстояниях его влияние может оказаться существенным. Френелевское отражение возникает на границе раздела сред (разъемы, соединители и др.) в результате воздушных зазоров, рассогласования или несовпадения показателей преломления по обе стороны границы раздела.

Отраженный оптический сигнал нежелателен по целому ряду причин:

- Он вносит вклад в общие потери мощности.
- Мощные лазерные передатчики, используемые в системах DWDM, очень чувствительны к отраженному свету, и это может серьезно ухудшить стабильность лазера и отношение сигнал/шум системы. В отдельных случаях сильный отраженный сигнал способен даже повредить лазерный передатчик.
- Отраженный назад световой сигнал может быть повторно отражен вперед. Такие отраженные запаздывающие копии исходного сигнала при распространении вперед вызывают сложности на этапе демодуляции. Это явление называют многолучевой интерференцией MPI (Multipath Interference).
- Отражения, возникающие внутри усилителя EDFA – особенно, если зона усиления расположена между отражающими границами – могут привести к дополнительной многолучевой интерференции и значительно увеличить шумы усилителя.

При прочих равных условиях компонент с коэффициентом отражения -55 дБ предпочтительнее компонента с коэффициентом отражения -50 дБ.

3.3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Можно выделить четыре основные явления в оптическом волокне, ограничивающие характеристики систем WDM – это хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия первого и второго порядка и нелинейные оптические эффекты.

3.3.1 Хроматическая дисперсия

Важной оптической характеристикой стекла, используемого при изготовлении волокна, является дисперсия показателя преломления, проявляющаяся в зависимости скорости распространения сигнала от длины волны – материальная дисперсия. Кроме этого, при производстве одномодового волокна, когда кварцевая нить вытягивается из стеклянной заготовки, в той или иной степени возникают отклонения в геометрии волокна и в радиальном профиле показателя преломления. Сама геометрия волокна вместе с отклонениями от идеального профиля также вносит существенный вклад в зависимость

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

скорости распространения сигнала от длины волны, это – волноводная дисперсия. Совместное влияние материальной и волноводной дисперсий называют хроматической дисперсией волокна, рис. 3.16.

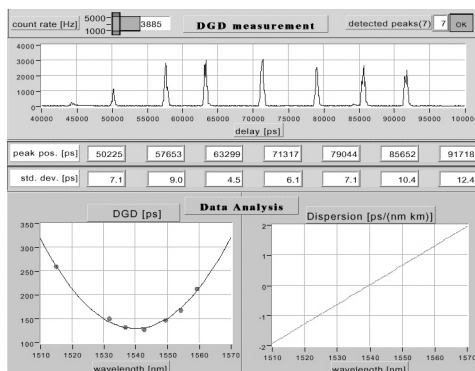


Рис. 3.16 Зависимость хроматической дисперсии от длины волны

Явление хроматической дисперсии ослабевает по мере уменьшения спектральной ширины излучения лазера. Даже если бы можно было использовать идеальный источник монохроматического излучения с нулевой шириной линии генерации, то после модуляции информационным сигналом произошло бы спектральное уширение сигнал, и тем больше уширение, чем больше скорость модуляции. Есть и другие факторы, приводящие к спектральному уширению излучения, из которых можно выделить chirпирование источника излучения.

Таким образом, исходный канал представлен не единственной длиной волны, а группой длин волн в узком спектральном диапазоне – волновым пакетом. Так как различные длины волн распространяются с разными скоростями (или точнее, с разными групповыми скоростями), то оптический импульс, имеющий на входе линии связи строго прямоугольную форму, по мере прохождения по волокну будет становиться все шире и шире. При большом времени распространения в волокне этот импульс может смешаться с соседними импульсами, затрудняя точное их восстановление. С увеличением скорости передачи и длины линии связи влияние хроматической дисперсии возрастает.

Хроматическая дисперсия, как уже говорилось, зависит от материальной и волноводной составляющих. При некоторой длине волны λ_0 хроматическая дисперсия обращается в ноль – эту длину волны называют длиной волны нулевой дисперсии. Одномодовое кварцевое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления обладает нулевой дисперсией на длине волны 1310 нм. Такое волокно часто называют волокном с несмещенной дисперсией.

Волноводная дисперсия в первую очередь определяется профилем показателя преломления сердцевинки волокна и внутренней оболочки. В волокне со сложным профилем показателя преломления, изменяя соотношение между дисперсией среды и дисперсией волновода, можно не только сместить длину волны нулевой дисперсии, но и подобрать нужную форму дисперсионной характеристики, т.е. форму зависимости дисперсии от длины волны.

Форма дисперсионной характеристики является ключевой для систем WDM, в особенности, по волокну со смещенной дисперсией (Рек. ITU-T G.653). Кроме параметра λ_0

используют параметр S_0 , описывающий наклон дисперсионной характеристики на длине волны λ_0 , рис. 3.17. В общем случае, наклон на других длинах волн отличается от наклона при длине волны λ_0 . Текущее значение наклона S_0 определяет линейную составляющую дисперсии в окрестности λ_0 .

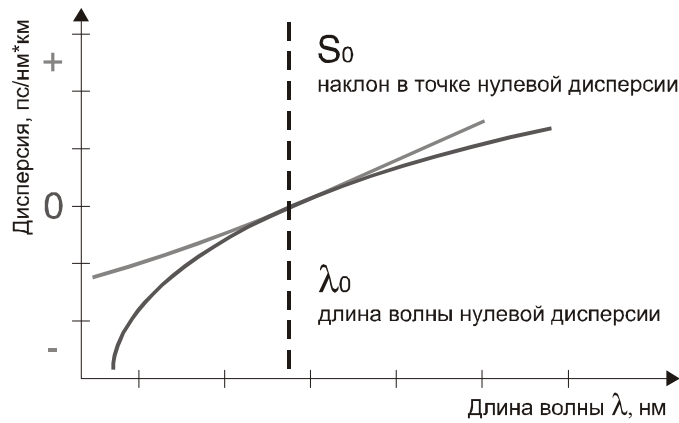


Рис. 3.17 Основные параметры зависимости хроматической дисперсии от длины волны: λ_0 – длина волны нулевой дисперсии и S_0 – наклон дисперсионной характеристики в точке нулевой дисперсии

Хроматическую дисперсию τ_{chr} (обычно измеряется в пс) можно рассчитать по формуле

$$\tau_{chr} = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L,$$

где $D(\lambda)$ – коэффициент хроматической дисперсии (пс/(нм*км)), а L – протяженность линии связи (км). Заметим, что данная формула не точна в случае ультра узкополосных источников излучения.

На рис. 3.18 отдельно показаны зависимости волноводной дисперсии для волокна с несмещенной (1) и смещенной (2) дисперсией и материальной дисперсии от длины волны.

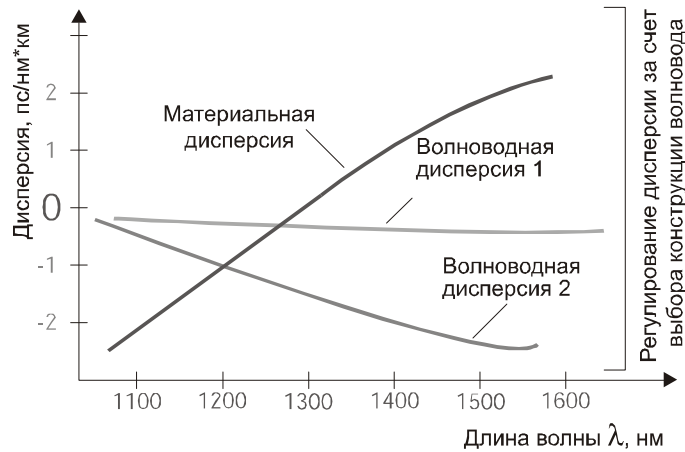


Рис. 3.18 Зависимость дисперсии от длины волны (хроматическая дисперсия определяется как сумма материальной и волноводной дисперсий.)

Хроматическая дисперсия системы передачи чувствительна к:

- увеличению длины и числа участков линии связи;
- увеличению скорости передачи (т.к. увеличивается эффективная ширина линии генерации источника).

На нее в меньшей степени влияют:

- уменьшение частотного интервала между каналами;
- увеличение числа каналов.

Хроматическая дисперсия уменьшается при:

- уменьшении абсолютного значения хроматической дисперсии волокна;
- компенсации дисперсии.

В системах WDM с обычным стандартным волокном (Рек. ITU-T G.652) хроматической дисперсии следует уделять особое внимание, так как она велика в области длины волны 1550 нм.

3.3.2 Поляризационная модовая дисперсия

Описать характеристики идеального оптического волокна относительно просто. Они включают характеристики распространения мощности по волокну, моды с заданным состоянием поляризации на заданной длине волны и некоторые другие характеристики. Однако когда волокно уложено в кабель, а кабель затем прокладывают в разнообразных местах и эксплуатируют при различных условиях, то волокно в кабеле становится далеко неидеальным. Возникающие в процессе производства волокна напряжения приводят к остаточным напряжениям в его сердцевине и оболочке, вызывая в дальнейшем трудной предсказываемые явления двойного лучепреломления, рис. 3.19. Кроме этого, механические воздействия на волокно в скрученном кабеле создают несимметричные напряжения, увеличивающиеся при его намотке. И, наконец, во время монтажа кабель непрерывно подвергается напряжениям. Это и установка арматуры, и прокладка в канализации, подсоединение соединительных муфт и т.д. Все эти механические воздействия ведут к локальным, псевдослучайно распределенным деформациям волокна, которые нарушают геометрию волокна или соосность сердцевины и оболочки.

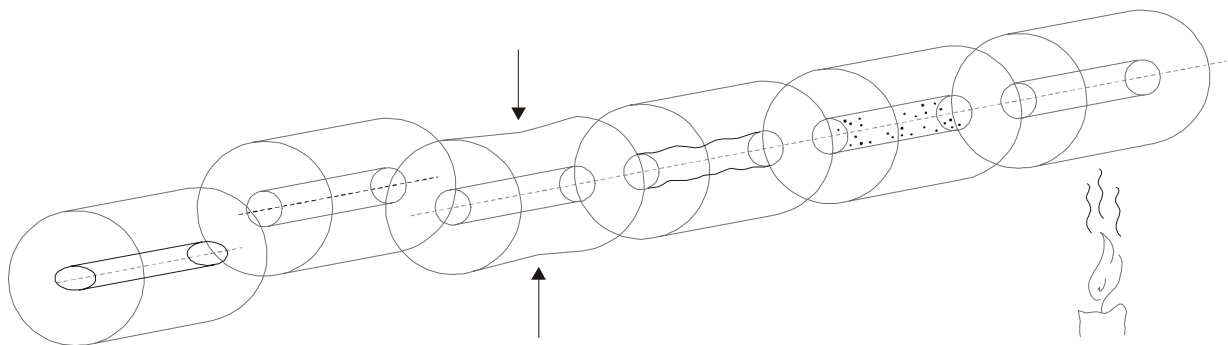


Рис. 3.19 Поляризационная модовая дисперсия PMD чувствительна к колебаниям температуры, механическим напряжениям и искажениям геометрии волокна

Поляризационная модовая дисперсия – это основной механизм, с помощью которого все дефекты волокна проявляются на характеристиках системы передачи.

В любой точке волокна импульс поляризованного оптического излучения можно разложить на поляризационные составляющие с двумя взаимно ортогональными состояниями поляризации, направленными вдоль двух локально ортогональных осей волокна, так называемых, быстрой и медленной осей. Отметим, что эти оси не обязательно соответствуют состоянию линейной поляризации. На практике, в уложенном в кабель волокне направление этих осей и относительная разность скоростей распространения по каждой оси (непосредственно зависящих от величины локального двулучепреломления) изменяются вдоль оптического пути. Для идеализированной модели явление PMD можно представить так, что различные участки волокна имеют постоянные, но различные на каждом участке направления осей двулучепреломления. (Локальное изменение ориентации главных осей двулучепреломления волокна известно как явление связи мод.) На каждом участке волокна возникнет временная задержка между компонентами оптического сигнала, разложенного по быстрой и медленной осям. Из-за того, что направление осей двулучепреломления соседних участков волокна меняется случайным образом, форма и границы оптического импульса претерпевают статистическое временное расплывание.

Для каждой выделенной длины волны излучения можно подобрать такую ориентацию плоскости поляризации оптического импульса на входе, что импульс при прохождении волокна не будет испытывать никакого расплывания (по крайней мере, на достаточно коротком интервале времени измерения, когда можно пренебречь изменениями внешних факторов).

Действительно, существуют два взаимно ортогональных состояния поляризации, называемые основными состояниями поляризации PSP (Principal State of Polarization). Одно из них соответствует самому быстрому, а другое самому медленному времени распространения импульса по волокну. Разница времен распространения называется дифференциальной групповой задержкой DGD (Differential Group Delay), соответствующей данной длине волны. Величина задержки PMD определяется как значение DGD усредненное по длинам волн, рис. 3.20.

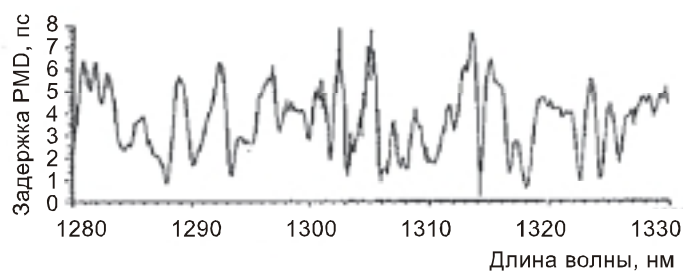


Рис. 3.20 Значение величины DGD, усредненное по рабочему диапазону длин волн, определяет значение PMD для волокна

Так как отдельные факторы, вызывающие поляризационную модовую дисперсию PMD, невозможно выделить и измерить, то явление PMD следует рассматривать как непрерывный и нестационарный стохастический процесс. Этот процесс приводит к уширению информационных оптических импульсов, что может ухудшить качество сигнала при его декодировании приемником, рис. 3.21. Таким образом, поляризационная модо-

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

вая дисперсия является существенным фактором, ограничивающим скорость передачи по волокну.

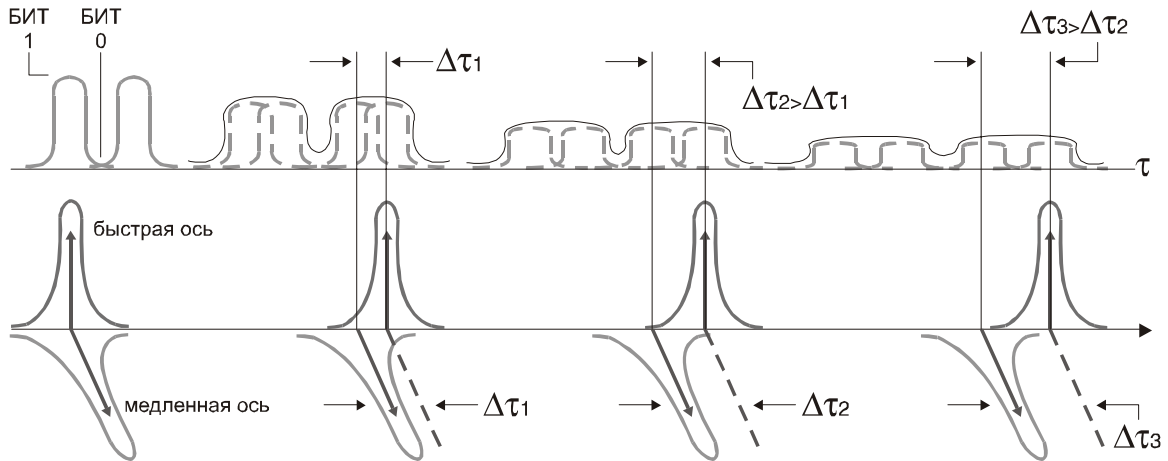


Рис. 3.21 Передаваемые биты информационного сигнала (0, 1) по мере распространения по волокну уширяются так, что не могут быть обнаружены фотоприемником

PMD измеряется в пс для каждого конкретного участка проложенного волокна в линии связи, рис. 3.22.

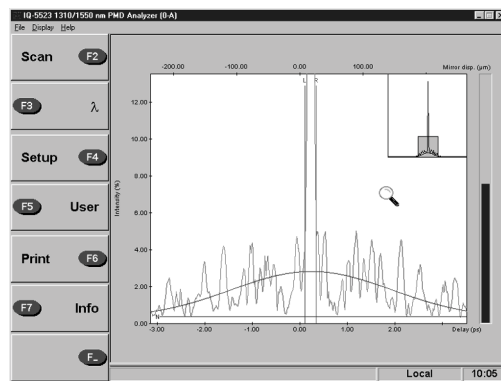


Рис. 3.22 Пример измерения PMD интерферометрическим методом

Для вычисления PMD линии связи, состоящей из нескольких участков, выполняют процедуру статистического суммирования. Общая поляризационная модовая дисперсия линии связи определяется как квадратный корень из суммы квадратов PMD отдельных участков, образующих линию связи:

$$PMD_{total} = \left(\sum_{n=1}^N PMD_n^2 \right)^{1/2}$$

Если, например, 9 из 10 участков линии имеют PMD по 0,2 пс каждая, а PMD десятого участка составляет 2 пс, то общая величина PMD линии будет равна 2,088 пс. Иными словами один плохой участок волокна портит общую картину для всей линии связи. Поэтому необходимо проводить тестирование всех участков линии в сети связи. Нет никаких оснований полагать, что если несколько измеренных участков имеют малые задержки PMD, то и вся линия будет иметь приемлемое значение PMD.

Влияние PMD на качество сигнала в линии связи возрастает при:

- увеличению скорости передачи (один из важнейших факторов);
- увеличению количества участков линии (равносильно увеличению длины оптического канала);
- увеличению количества каналов (при большем числе каналов возрастает вероятность большого отклонения дифференциальной групповой задержки от среднего значения хотя бы в одном канале).

Уменьшение частотного разнесения каналов влияет на PMD незначительно (если такое уменьшение не ведет к увеличению числа каналов в фиксированной полосе пропускания, как, например, в полосе усиления EDFA, равной 40 нм). Однако PMD можно уменьшить, тщательно контролируя геометрию волокна или увеличивая связь мод в волокне (уровень обмена мощностью между основными состояниями поляризации). Влияние технологии компенсации хроматической дисперсии на PMD еще не до конца ясно, но исследования в этом направлении продолжаются. Солитонные системы передачи, использующие кодирование с возвратом к нулю, показали меньшую чувствительность к воздействию PMD, чем схемы кодирования без возврата к нулю, рис. 3.23.

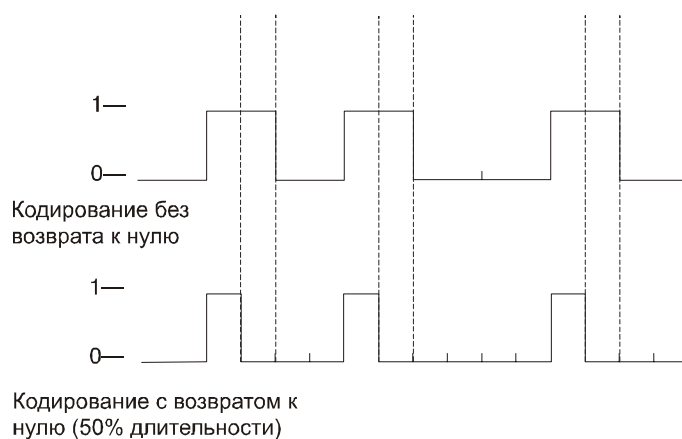


Рис. 3.23 При кодировании с возвратом к нулю длительность интервала для бита 1 (наличие сигнала) уменьшается, что снижает вероятность перекрытия импульсов при их расплывании

Явление PMD является серьезным препятствием при установке систем WDM на сетях с обычным волокном, соответствующим Рек. ITU-T G.652 (в конце 1980-х годов было проложено свыше 80 миллионов километров такого волокна). При использовании новых типов волокна, соответствующих Рек. ITU-T G.653, G.654 и G.655, проблема PMD не стоит столь остро.

Критерии для оценки удельного коэффициента PMD, обеспечивающие необходимый относительный уровень ошибок по битам приемника, разработаны и предложены ITU, Табл. 3.24. Коэффициент PMD характеризует само волокно и как было указано выше измеряется в единицах $\text{пс}/\text{км}^{1/2}$.

Таблица. 3.24 Максимальное значение PMD для заданной скорости передачи

| Рекомендуемый коэффициент PMD обеспечивающий с вероятностью 99,994% дифференциальную задержку менее 0,1 длительности бита при запасе мощности не превышающем 1 дБ | | |
|---|--------------------------------|---|
| Битовая скорость (Гбит/с) | Максимальная задержка PMD (пс) | Коэффициент PMD для волокна длиной 400 км (пс/км ^{1/2}) |
| 2,5 | 40 | 2,0 |
| 10 | 10 | 0,5 |
| 20 | 5 | 0,25 |
| 40 | 2,5 | 0,125 |

На рис. 3.25 представлены критерии PMD в другой форме. Для каждой из трех стандартных скоростей передачи даны зависимости дополнительного запаса мощности приемника для надежного декодирования сигнала от заданной дифференциальной групповой задержки (т.е. разности групповых скоростей распространения основных состояний поляризации).

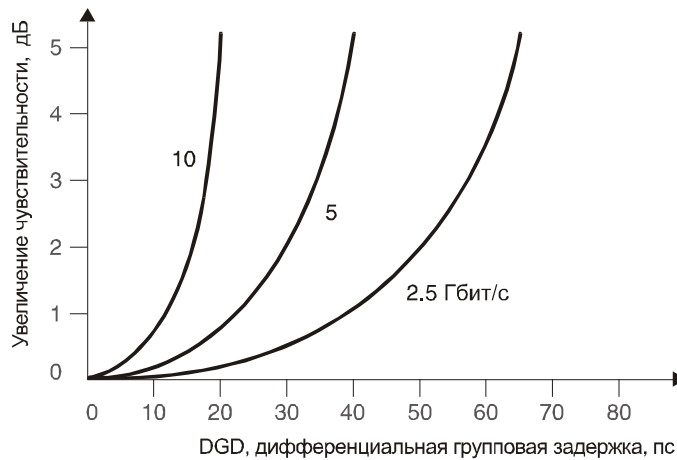


Рис. 3.25 Дополнительный запас по чувствительности, связанный с PMD

Как отмечалось ранее, вклад в PMD вносит не только волокно, но и отдельные компоненты системы связи. Однако в последнем случае, вклад в PMD является постоянной, не случайной величиной. Уменьшение влияния PMD отдельных компонентов достигается путем контроля качества в процессе их производства.

3.3.3 Поляризационная модовая дисперсия второго порядка

До недавнего времени PMD второго порядка, учитывающая зависимость поляризационной модовой дисперсии от длины волны, оказывала пренебрежимо малое воздействие на характеристики сети. Но после того как скорость передачи превысила 10 Гбит/с, это явление встало в ряд факторов, ухудшающих характеристики систем передачи. В одномодовых волокнах большой длины явление PMD второго порядка всегда сопровождается с явлением PMD первого порядка. (Между ними имеется простое математиче-

ское соотношение для случая широко распространенных волокон с сильной связью мод). Тем не менее, PMD второго порядка приводит к снижению эффективности системы только при наличии хроматической дисперсии линии связи или при возникновении чирпирования частоты передатчика. PMD второго порядка может иметь тот же порядок величины, что и хроматическая дисперсия, и прямо пропорциональна длине линии в отличие от PMD первого порядка. Поэтому PMD второго порядка в первую очередь учитывают для линий дальней связи. Однако в отличие от хроматической дисперсии PMD второго порядка проявляет стохастический характер.

Статистика распределения вероятности DGD влияет на PMD второго порядка тем сильнее, чем меньше требуемый коэффициент ошибок. PMD второго порядка в какой-то степени зависит от скорости изменения величины DGD с изменением длины волны. Однако гораздо сильнее величина PMD второго порядка зависит от изменения направления основных состояний поляризации на выходе волокна при изменении частоты оптического сигнала.

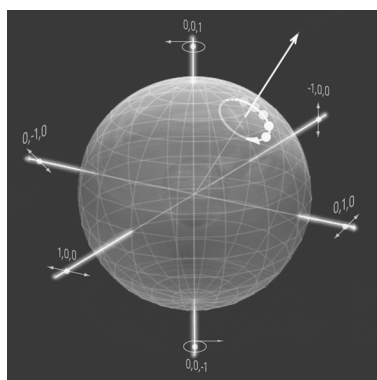


Рис. 3.26 Поляризационная модовая дисперсия PMD второго порядка определяется вариациями ориентации вектора поляризационной дисперсии и его величины (т. е., DGD) как функции длины волны излучения

3.3.4 Нелинейности

Нелинейные эффекты в волоконной оптике подобны нелинейным эффектам в других физических системах (механических или электронных). Они порождают генерацию паразитных гармоник на частотах равных сумме или разности основных частот системы. Эти дополнительные сигналы приводят к непредсказуемым явлениям потерь в оптических сетях связи.

Нелинейность волокна не является дефектом производства или конструкции волокна. Это неотъемлемое свойство материальной среды при распространении в ней любой электромагнитной энергии. Как разработчикам, так и операторам волоконно-оптических сетей связи следует учитывать нелинейные эффекты из-за высокой когерентности используемого лазерного излучения. При заданном уровне передаваемой мощности напряженность электрического поля возрастет с увеличением степени когерентности излучаемых волн. Таким образом, в системах WDM с высокой степенью когерентности оптические сигналы даже умеренной мощности могут приводить к нелинейным явлениям.

Нелинейность волокна становится ощутимой, когда интенсивность лазерного излучения (мощность на единицу поперечного сечения) достигает порогового значения. Кро-

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

ме того, влияние нелинейностей обнаруживается после прохождения сигналом некоторого пути по волокну в зависимости от параметров, конструкции волокна и условий его работы.

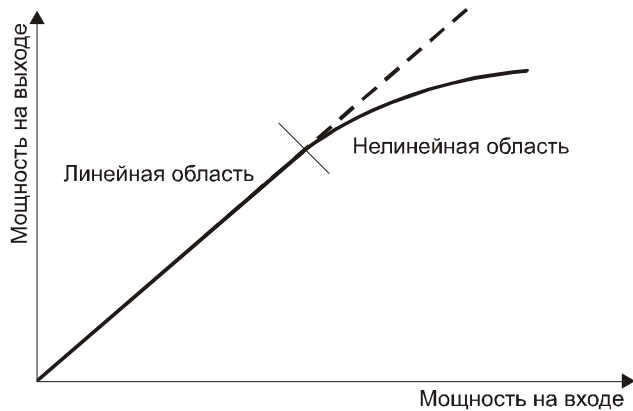


Рис. 3.27 Нелинейность проявляется при высоком уровне мощности

Действительно, напряженность электрического поля E распространяющегося оптического сигнала пропорциональна его мощности P , умноженной на квадратичную по полю нелинейную добавку n_2 показателя преломления волокна и деленной на эффективную площадь сердцевины волокна A_{eff} , и может быть представлена как:

$$E(z + dz) = E(z) \exp[(-\alpha/2 + i\beta + \gamma P(z, t)/2)dz],$$

где α – затухание в волокне, β – фаза распространяющейся волны, а γ – коэффициент нелинейности, равный $(2\pi/\lambda)(n_2/A_{eff})$. Если предположить, что оптическое излучение распространяется в волокне в виде гауссова пучка, то эффективную площадь можно выразить через диаметр модового поля волокна MFD (Mode Field diameter):

$$A_{eff} = \pi \cdot MFD^2$$

Для волокон со смещенной дисперсией (Рек. ITU-T G.653) и с ненулевой смещенной дисперсией (Рек. ITU-T G.655) эффективная площадь A_{eff} приблизительно равна 50-60 мкм², в то время как для волокна со смещенной дисперсией (Рек. ITU-T G.652) она составляет около 80 мкм². Иногда используют понятие эффективной длины волокна L_{eff} ($\gamma \sim 1/L_{eff}$), дающей тот же эффект, что и величина A_{eff} . Для типичного одномодового волокна L_{eff} составляет 20 км.

В зависимости от характера поведения нелинейного коэффициента γ все нелинейные явления можно разделить на две категории. Это явления рассеяния (когда действительная часть коэффициента γ дает усиление или затухание) и явления преломления (когда мнимая часть коэффициента γ приводит к фазовой модуляции).

В явлениях рассеяния сигнал лазера рассеивается на звуковых волнах (акустических фонах) или на молекулярных колебаниях волокна (оптических фонах) и смещается в область более длинных волн. Имеют место два следующих эффекта рассеяния:

- вынужденное обратное рассеяние Бриллюэна–Мандельштама (на акустических фонах);
- вынужденное рамановское или комбинационное рассеяние (на оптических фонах).

В явлениях, зависящих от показателя преломления, при высоком уровне мощности сигнала необходимо учитывать нелинейность показателя преломления:

$$n = n_0 + n_2 I,$$

где n_0 – показатель преломления волокна, n_2 – коэффициент нелинейности показателя преломления волокна ($(2...3) \times 10^{-16}$ см²/Вт для кварцевого волокна), I – интенсивность оптического сигнала. К явлениям, зависящим от показателя преломления, относятся:

- фазовая автомодуляция или воздействие сигнала на собственную фазу;
- перекрестная фазовая модуляция или воздействие сигнала одного канала на фазу сигнала в другом канале;
- четырехволновое смешение или смешение некоторого числа волн с возникновением излучения на новых длинах волн.

Вынужденное обратное рассеяние Бриллюэна - Мандельштама

При вынужденном обратном рассеянии Бриллюэна-Мандельштама сигнал лазера создает периодические области с переменным показателем преломления, т.е. дифракционную решетку, которая расходится от оптического пучка подобно акустической волне. Отражения, вызванные этой виртуальной решеткой, усиливаются (складываются) и обнаруживаются в форме обратно рассеянного света с доплеровским понижением частоты (сдвигом в область длинных волн). Данное явление может приводить к значительному повышению уровня шумов и нестабильности распространения оптического сигнала, так как большая часть его мощности рассеивается назад.

Например, для оптического сигнала с длиной волны 1525 нм в волокне, соответствующем Рек. ITU-T G.653, рассеиваемый обратно сигнал понижает свою частоту примерно на 10,7 ГГц (+0,085 нм) при полосе пропускания около 60 МГц. Для волокон Рек. ITU-T G.652 рассеиваемый обратно сигнал в том же волновом диапазоне снижает частоту на 11 ГГц (+0,088 нм) при полосе пропускания около 30 МГц. На практике явление SBMS начинают учитывать, если мощность монохроматического пучка света в волокне превышает 6 дБм.

Для подавления обратного рассеяния Бриллюэна-Мандельштама в существующих системах был разработан ряд методик. Наиболее популярная заключается в быстром (~50 КГц) размывании длины волны несущей частоты в диапазоне порядка 1 ГГц, что намного больше полосы пропускания рассеянного назад сигнала (30-60 МГц).

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

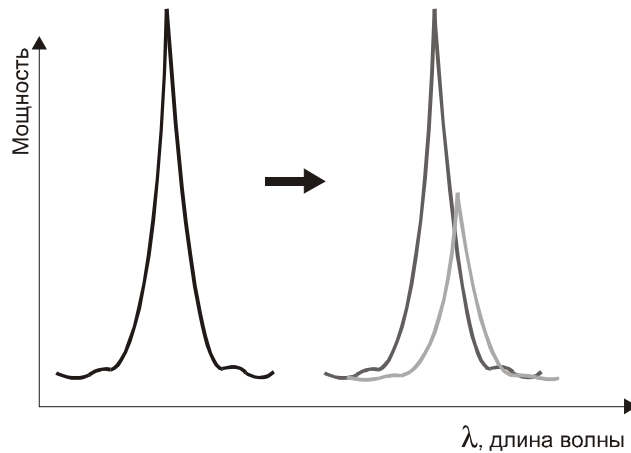


Рис. 3.28 Обратное рассеяние Бриллюэна-Мандельштама приводит к возникновению сигнала с понижением частоты на 11 ГГц

Вынужденное комбинационное рассеяние (Рамана)

Коэффициент комбинационного рассеяния (Рамана) намного меньше (сечение комбинационного рассеяния 10-12 см²/Вт), чем в явлении обратного рассеяния Бриллюэна - Мандельштама. При этом частота сигнала понижается намного больше. Для волн из диапазона 1550 нм она понижается от 10 до 15 ТГц, что соответствует увеличению длины волны на 100 нм. Рассеиваемый сигнал имеет намного большую ширину полосы пропускания (около 7 ТГц или 55 нм). В системах WDM данное явление служит механизмом переноса энергии от коротковолновых каналов к длинноволновым.

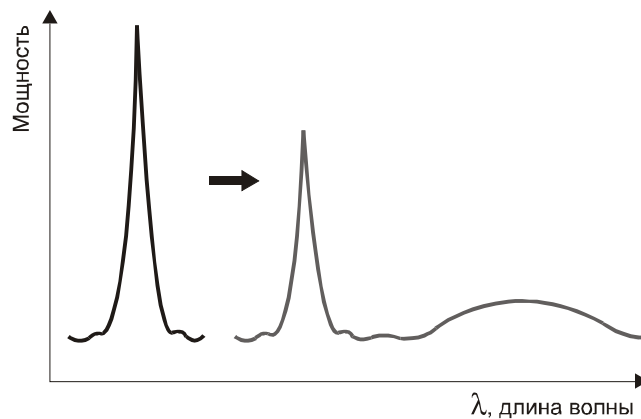


Рис.3.29 Комбинационное рассеяние (Рамана) имеет очень широкий пик

Фазовая автомодуляция

При очень высокой интенсивности лазерного излучения сигнал может модулировать свою собственную фазу. Такая модуляция расширяет спектр сигнала и уширяет или сжимает сигнал во времени в зависимости от знака хроматической дисперсии (положительного или отрицательного). В хвосте волнового пакета возникает сдвиг к более коротким длинам волн, а на переднем фронте - в область длинных.

В системах WDM сигнал в спектрально уширенном фазовой автомодуляцией канале, может интерферировать с сигналами соседних каналов.

Фазовая автомодуляция возрастает при:

- увеличении вводимой в канал мощности при постоянном эффективном сечении волокна;
- увеличении скорости передачи в канале (при высоких скоростях передачи фронт нарастания-спада информационного импульса более крутой);
- отрицательной хроматической дисперсии.

Фазовая автомодуляция создает больше проблем для систем WDM с волокном Рек. G.652 (нулевая дисперсия при 1310 нм) по сравнению с системами, использующими волокно со смещенной дисперсией при 1550 нм (Рек. ITU-T G.653) и с ненулевой смещенной дисперсией (Рек. ITU-T G.655). Уменьшение частотного интервала между каналами или увеличение числа каналов в системе незначительно влияют на рассматриваемое явление.

Фазовая автомодуляция уменьшается при:

- нулевой или небольшой положительной хроматической дисперсии;
- увеличении эффективного сечения волокна;
- компенсации дисперсии.

Перекрестная фазовая модуляция

Явление перекрестной фазовой модуляции заключается в том, что сигнал одного канала модулирует фазы сигналов в соседних каналах. Перекрестная фазовая модуляция СРМ (Cross-Phase Modulation) чувствительна к тем же факторам, что и явление фазовой автомодуляции, а также к увеличению числа каналов. Разнесение каналов, как и при фазовой автомодуляции, на нее практически не влияет, но явление СРМ уменьшается при:

- увеличении эффективного сечения волокна;
- компенсации дисперсии;

Перекрестная фазовая модуляция менее актуальна в системах WDM, использующих волокна с большим эффективным сечением.

Четырехволновое смешение

Четырехволновое смешение FWM (Four-Wave Mixing) является одним из самых вредных нелинейных оптических явлений в системах WDM. При достижении критического уровня мощности излучения лазера нелинейность волокна приводит к взаимодействию трех волн с частотами ω_i , ω_j , ω_k и появлению новой четвертой волны на частоте $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Некоторые частоты таких ложных сигналов могут попасть в рабочие полосы пропускания каналов. Число таких ложных сигналов определяется соотношением:

$$N^2(N-1)/2$$

где N – число каналов, передающих сигналы. Таким образом, в четырехканальной системе WDM возникает 24 ложных сигнала, а в 16-канальной уже 1920!, рис. 3.30.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

Помехи такого типа могут стать катастрофическими для приемного устройства на конце линии.

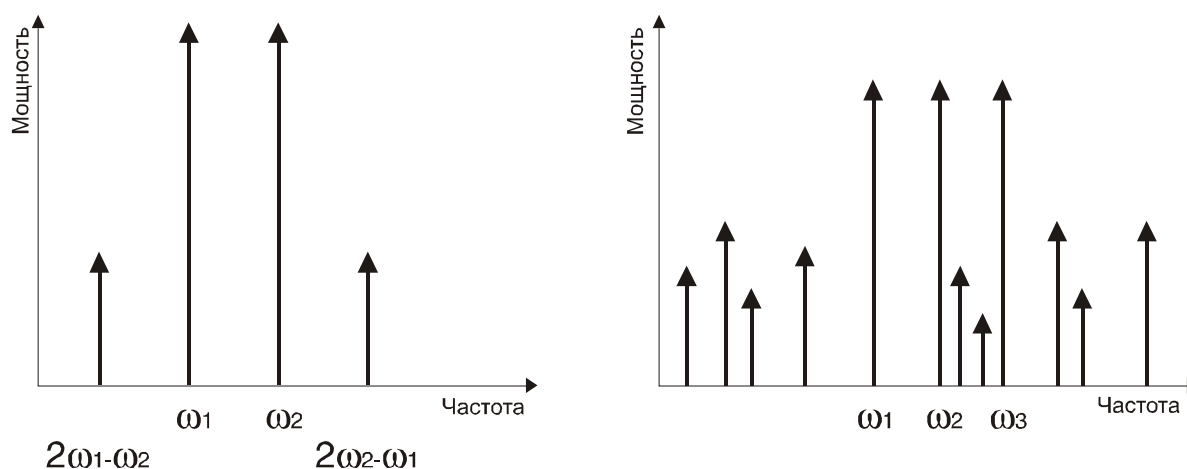


Рис. 3.30. Четырехволновое смешение приводит к появлению нежелательных сигналов в спектральном диапазоне систем передачи

Четырехволновое смешение чувствительно к:

- увеличению мощности канала;
- уменьшению частотного интервала между каналами;
- увеличению числа каналов (несмотря на то, что может быть достигнут уровень порога насыщения).

Действие четырехволнового смешения нужно учитывать в системах, использующих волокно со смещенной дисперсией (Рек. G.653). Оно менее критично в волокнах с ненулевой смещенной дисперсией (Рек. G.655), особенно в волокнах с большой эффективной площадью. Увеличение скорости передачи в канале незначительно влияет на эффективность четырехволнового смешения.

Влияние четырехволнового смешения уменьшается при:

- увеличении эффективной площади волокна;
- увеличении абсолютного значения хроматической дисперсии.

Явление четырехволнового смешения менее опасно в системах DWDM, использующих волокно с несмещенной дисперсией (Рек. G.652) на длине волны 1550 нм, так как дисперсионная характеристика в этом случае относительно пологая. Для волокна со смещенной дисперсией (Рек. G.653) дисперсионная кривая имеет крутой наклон в этом диапазоне и явление FWM необходимо учитывать.

3.4 ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Оптические усилители на волокне легированном эрбием EDFA являются основой для построения экономически оправданных сетей DWDM. Усилители EDFA обеспечивают “прозрачное” усиление всех каналов независимо от протоколов или схемы модулирования сигналов, используемых каждым каналом. Усилители EDFA открывают возможность передачи модулированного оптического сигнала на очень большие расстояния без необходимости восстановления и регенерации передаваемой информации. Однако при проектировании сети необходимо определить и учесть зависимость коэффициента усиления усилителя EDFA от длины волны, особенно в случае передачи отдельных каналов через несколько усилителей. Кроме этого, накопление шумов за счет проявления шум-фактора в нескольких последовательно расположенных в линии связи усилителях EDFA может привести к невозможному разрушению оптического сигнала. Точный учет шум-фактора усилителей необходим для определения предельного числа каскадов усиления, а, следовательно, и максимальной длины линии связи.

Коэффициент усиления – одна из самых важных измеряемых характеристик оптического усилителя. Коэффициент усиления зависит от множества параметров, которые по отдельности или вместе, могут влиять на эффективность усилителя. Коэффициент усиления зависит от длины волны сигнала, состояния поляризации на входе и мощности сигнала. Кривая усиления (рис. 3.31), характеризующая спектральное усиление всех каналов, меняется в зависимости от распределения подаваемой в каждый канал мощности. С ее помощью, таким образом, можно оценивать и контролировать временное перераспределение входной мощности, например, при добавлении или удалении канала в различных многоканальных приложениях.

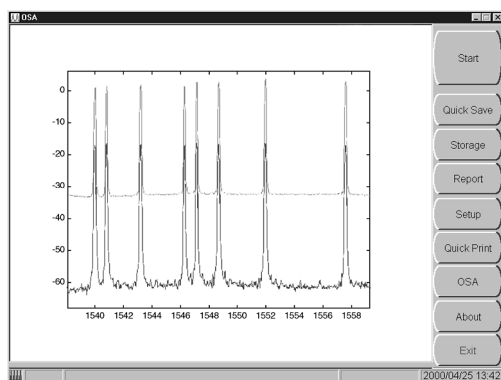


Рис. 3.31 Коэффициент усиления может меняться от одного канала к другому

Коэффициент усиления G (измеряется в дБ) определяется как отношение средней выходной P_{out} и входной P_{in} мощности, за вычетом вклада усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission) самого усилителя

$$G = 10 \lg \left[\frac{P_{out}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{in}(\lambda_c)} \right]$$

где $P_{out}(\lambda_c)$ – средняя выходная мощность на длине волны канала λ_c в мВт; $P_{ASE}(\lambda_c)$ – мощность усиленного спонтанного усиления в мВт; и $P_{in}(\lambda_c)$ – средняя входная мощность в мВт.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

Коэффициент усиления оптического усилителя в значительной степени зависит от уровня входного сигнала, рис. 3.32. Обычно усилитель хорошо усиливает слабые входные сигналы (например, типичный коэффициент усиления >30 дБ для предусилителя EDFA достигается при входном сигнале < -20 дБм). Для входных сигналов средней мощности коэффициент усиления начинает отклоняться от прежнего значения. Точка спада на кривой коэффициента усиления является важным параметром усилителя. Она определяется по уровню спада на 3 дБ коэффициента усиления относительно усиления слабых сигналов.

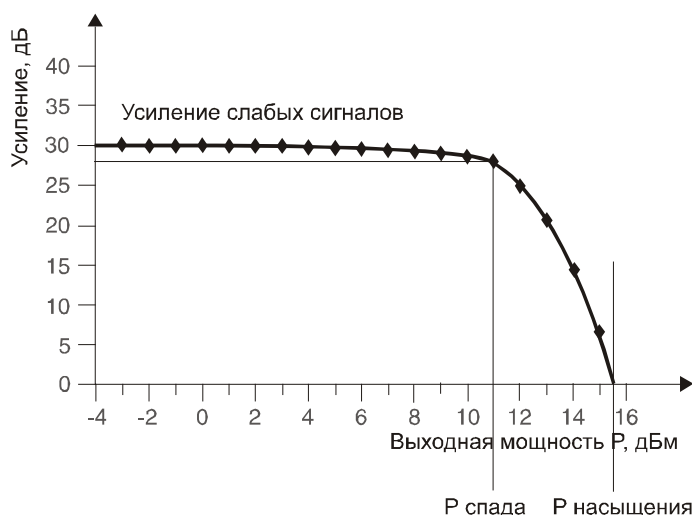


Рис. 3.32 Коэффициент усиления EDFA в рабочей области является равномерным

Для входных сигналов с высоким уровнем мощности (для усилителя EDFA обычно >3 дБм) усилитель выходит на режим глубокого насыщения коэффициента усиления. Выходная мощность усилителя, равная входной, называется выходной мощностью насыщения (при которой коэффициент усиления равен 1).

В общем случае значения этих трех ключевых параметров усилителя – коэффициент усиления слабых сигналов, точка спада усиления (по уровню 3 дБ) и выходная мощность насыщения – меняются с длиной волны входного сигнала. Поэтому для получения всесторонней характеристики усилителя потребуется система, выполняющая измерения при разных входных мощностях и для целого ряда интересующих длин волн.

Для DWDM-приложений может потребоваться характеристика усилителя при насыщении коэффициента усиления одного из каналов. Усилитель вводится в режим насыщения по одному каналу, а далее измеряется усиление на длинах волн остальных каналов. Исследование во всем спектре рабочих длин волн выявляет спектральную зависимость измеряемого параметра. Можно также выполнить двусторонние измерения, чтобы определить так называемый коэффициент усиления слабых обратных сигналов при насыщении.

Коэффициент усиления перекрестного насыщения

Коэффициент усиления перекрестного насыщения определяется как изменение коэффициента усиления отдельного канала при изменении мощности, подаваемой на вход другого (других) канала, на определенную величину.

Равномерность коэффициента усиления

Равномерность коэффициента усиления определяется максимальным разбросом коэффициента усиления различных каналов при одной и той же входной мощности.

Зависимость коэффициента усиления от поляризации

Зависимость коэффициента усиления от поляризации PDG (Polarization Dependent Gain) определяется различием коэффициента усиления для различных входных состояний поляризации. На практике сканируют все возможные входные состояния поляризации, либо ограничиваются случайной выборкой состояний, и определяют наименьший и наибольший коэффициенты усиления.

Коэффициент усиления сигнала

Коэффициент усиления сигнала усилителя EDFA - это коэффициент усиления мощного сигнала, например, сигнала трафика, при котором усилитель обычно начинает переходить в режим насыщения. Это основной фактор, определяющий рабочую точку усилителя. В противоположность этому коэффициент усиления слабых сигналов практически никак не влияет на положение рабочей точки усилителя (см. рис. 3.32).

Профиль

Понятие профиль (кривая, характеристика) часто используют для выражения зависимости некоторого параметра, например, усиления, от длины волны. Например, усиление шума может быть выражено с помощью определенного значения (измеренного в дБ), в то время как профиль усиления шума описывает спектральную зависимость этого параметра.

Коэффициент усиления канала

Под коэффициентом усиления канала понимают усиление одного отдельного сигнала в системе DWDM. В общем случае коэффициент усиления канала будет разным для различных каналов и длин волн. Спектральная равномерность (или равномерность усиления) описывает изменение коэффициента усиления с длиной волны, иными словами наклон профиля коэффициента усиления, измеряемое в дБ/нм. Наклон профиля коэффициента усиления позволяет определить изменение коэффициента усиления при добавлении или удалении канала на заданной длине волны.

3.4.1 Усиленное спонтанное излучение

Основным источником шумов оптического усилителя является усиленное спонтанное излучение ASE. Вследствие широкополосности ASE в чем-то похоже на фоновый шум обычного звукового усилителя. На анализаторе оптического спектра можно обнаружить характерный для шумов фоновый пьедестал во всем наблюдаемом спектре. Это и есть спектр ASE. Усиленное спонтанное излучение приводит к появлению ВЧ-шумов в системе связи (т.е. высокочастотных шумов в электрическом сигнале на выходе приемника) с помощью механизма, который подробнее будет рассмотрен ниже.

Легированное ионами эрбия кварцевое волокно с оптической накачкой является усиливающей средой. В такой среде имеются три энергетических уровня, рис. 3.33. За счет

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

поглощения световой энергии генератора накачки ионы эрбия переходят с основного уровня N_1 на возбужденный уровень N_3 , а затем постепенно безызлучательно переходят на метастабильный энергетический уровень N_2 . Переход с этого уровня в основное состояние ($N_2 \rightarrow N_1$) с излучением фотонов на длине волны 1550 нм может быть как спонтанным, так и вынужденным.

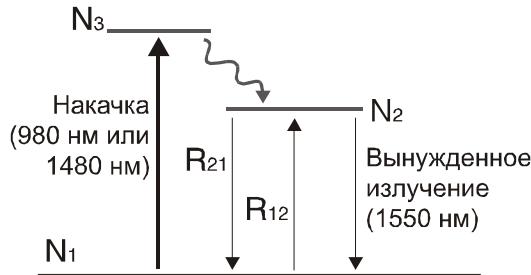


Рис. 3.33 Трехуровневая система типичного усилителя EDFA

Метастабильный уровень имеет относительно большое время жизни (около 10 мс). Следовательно, ионы эрбия могут оставаться в таком возбужденном состоянии продолжительное время, что приводит к возникновению инверсной заселенности. При возникновении инверсии происходит также спонтанное излучение отдельных атомов или ионов. В усиливающей среде усилителя EDFA (рис. 3.34) имеется определенная вероятность того, что фотоны излучения будут захвачены в соседних участках легированного волокна и вызовут излучение с возбужденного (инверсно заселенного) уровня. Этот процесс приводит к последовательному нарастанию (усилению) спонтанного излучения и называется усиленным спонтанным излучением ASE. Излучение ASE распространяется в обоих направлениях вдоль волокна.

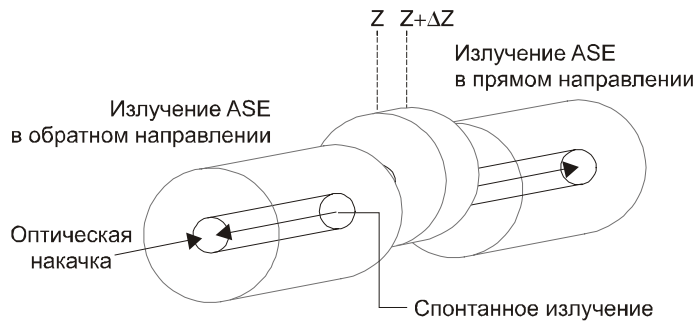


Рис. 3.34 Каждый малый участок волокна ($z, z+\Delta z$) порождает усиленное спонтанное излучение ASE в прямом и обратном направлениях

Измерив, уровень шума $N_{in}(\lambda)$ во входном сигнале и уровень полного шума $N_{out}(\lambda)$ в сигнале на выходе усилителя, можно найти мощность излучения ASE из следующего уравнения:

$$N_{out}(\lambda) = N_{in}(\lambda) \cdot G + P_{ASE}$$

При спаде или насыщении коэффициента усиления вклад излучения ASE невелик. Коэффициент усиления определяется просто как отношение мощностей на выходе и входе без учета усиленного спонтанного излучения (см. рис. 3.35).

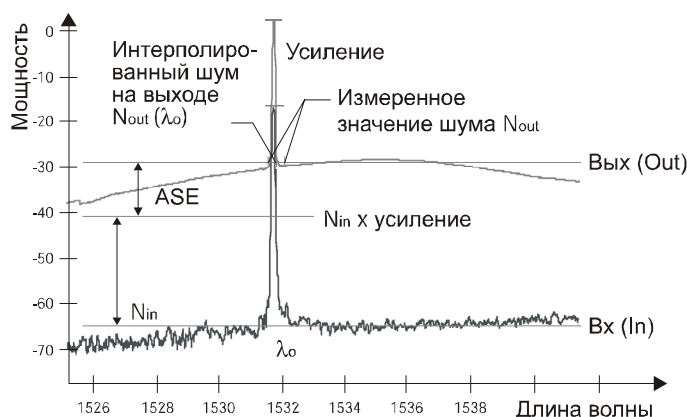


Рис. 3.35 Измерение различных уровней мощности позволяет определить значение ASE и коэффициент усиления в линейном режиме

3.4.2 Шум-фактор

Шум-фактор NF (Noise Figure) определяется как ухудшение отношения сигнал/шум после прохождения сигнала через оптический усилитель. В этом вопросе часто возникает путаница. Используемое здесь отношение сигнал/шум определяется путем детектирования информационного сигнала, а не через отношение мощностей оптической несущей к сопутствующему излучению ASE, наблюдаемых на анализаторе оптического спектра.

На ухудшение отношения сигнал/шум могут влиять несколько процессов:

- дробовой шум;
- спонтанно-спонтанный шум биений (гетеродинный шум);
- сигнал-спонтанный шум биений (гетеродинный шум);
- интерференционный шум;
- дополнительные шумы (шумы источника)

Первый источник шума – дробовой шум – есть неизбежное проявление дискретной природы света. Он возникает из-за случайных флуктуаций времени прибытия фотонов, составляющих сигнал, или, более точно, из-за флуктуаций количества рождаемых электронов на фотодетекторе. Дробовой шум по своему характеру “белый”, т.е. имеет равномерный спектр. В большинстве приложений поток фотонов N настолько высок, что можно пренебречь флуктуациями порядка $N^{1/2}$ (среднеквадратичный разброс распределения Пуассона).

Между сигналами усиленного спонтанного излучения ASE в полосе частот амплитудно-модулированного сигнала возникает спонтанно-спонтанный шум биений (ASE-ASE шумы биений, называемые иногда гетеродинным шумом), дающий вклад в шум-

¹ Следует отметить, что в оптическом усилителе на заданной длине волны (λ_0 на рисунке 3.35) возникает вынужденное излучение, которое имеет ту же фазу и направление, что и полезный входной сигнал. Вынужденное излучение и обеспечивает усиление входного сигнала, прим. ред. перевода.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

фактор. Так как шумы ASE уменьшаются с увеличением выходной мощности или при приближении к насыщению коэффициента усиления, то этими шумами в усилителях мощности обычно пренебрегают. Однако спонтанно-спонтанный гетеродинный шум в предусилителях без узкополосных фильтров, может оказаться существенным.

Гетеродинный шум возникает при биении двух некоррелированных, сигналов с близкими частотами. В усилителе EDFA каждый частотный интервал излучения ASE (например, шириной в 1 Гц) может взаимодействовать с излучением соседних интервалов, вызывая интерференцию, примерный спектр которой показан на рис. 3.36. Использование узкополосных оптических фильтров позволяет устранить возникновение данного вида шумов для всех приложений.

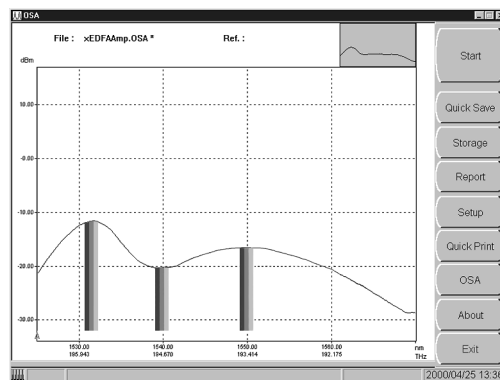


Рис. 3.36 Образование спонтанно-спонтанного гетеродинного шума; серые столбики показывают различные вклады в шумы усиленного спонтанного излучения ASE других соседних шумовых источников излучения ASE

Сигнал-спонтанный гетеродинный шум (ASE-гетеродинный шум) возникает при смешении сигнала гетеродина с существенно белыми шумами излучения ASE. Так как частота биений сигнала с окружающими шумами излучения ASE оказывается внутри полосы частот несущей, промодулированной полезным сигналом, то данные шумы нельзя подавить в сигнале ни оптическим, ни электрическим фильтрами. Поэтому их измерение становится важным и включается в характеристики шум-фактора большинства усилителей EDFA.

Шум-фактор NF (измеряется в дБ), обусловленный сигнал-спонтанным гетеродинным шумом, можно определить по мощности P_{ASE} на длине волны сигнала λ_c (на рис. 3.37 P_{ASE} расположено ниже мощности сигнала), коэффициенту усиления G и измеренной ширине полосы B (в герцах) следующим образом:

$$NF = 10 \lg \left[\frac{P_{ASE}(\lambda_c)}{G(\lambda_c) \cdot h\nu \cdot B} \right]$$

Так как сигнал-спонтанный гетеродинный шум невозможно отфильтровать в отличие от спонтанно-спонтанного гетеродинного шума, то шум-фактор усилителя обычно определяется на основе этого механизма.

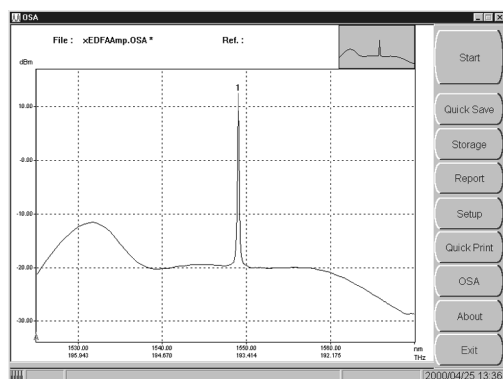


Рис. 3.37 Шум-фактор определяется через измеренную спектральную плотность излучения ASE на пиковой длине волны сигнала

3.4.3 Шумы многолучевой интерференции

Многолучевая интерференция MPI (MultiPath Interference) возникает из-за небольших внутренних отражений в усилителе EDFA, которые могут ухудшить его рабочие характеристики. Из-за большого коэффициента усиления эти отражения могут оказать серьезное и непредсказуемое воздействие (эффект паразитного резонатора), которое и проявляется в спектре относительной интенсивности шума RIN в виде множественных, беспорядочных пиков. Так как на этапе производства усилителей EDFA слишком трудно анализировать обратные отражения, возникающих в местах сращивания волокон, соединителях и т.п., то влияние MPI на усилители измеряют уже после их изготовления. Рассмотренные ранее методы определения шум-фактора не подходят для измерения шумов многолучевой интерференции. Для этих целей используют метод вычитания относительной интенсивности шума. Для большинства приложений многолучевая интерференция в усилителях является недопустимой. Шум-фактор MPI оптического усилителя определяется по следующей формуле:

$$NF_{MPI}(\lambda) = SNR_{out}(\lambda) - SNR_{in}(\lambda),$$

где все величины выражены в дБ, а SNR_{in} и SNR_{out} обозначают отношение сигнал/шум на входе и выходе усилителя. Также предполагается, что при измерении используется узкополосный фильтр на входе приемника.

Идеальный шум-фактор, т.е. минимально возможный коэффициент шума для усилителя с большим коэффициентом усиления, составляет около 3 дБ и достигается при накачке на длине волны 980 нм и полной инверсной заселенности возбужденного энергетического уровня ионов эрбия.

3.5 ПЕРЕДАТЧИКИ

Полоса пропускания системы DWDM распределяется между многочисленными каналами с различными длинами волн. Все эти длины волн должны разместиться в рабочей области усилителя EDFA. Если в системе много каналов, то каждый из них необходимо тщательно контролировать. Успешное решение данной задачи определяется характеристиками источников излучения каждого канала. Но и для систем WDM с небольшим числом каналов сохраняется необходимость строгого контроля характеристик передатчика. Она диктуется такими соображениями, как соблюдение международных стандар-

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

тов или совместимость с соседними сетями, потенциально допускающими переход к технологии волнового мультиплексирования. В следующих параграфах рассматриваются основные требования к передатчикам.

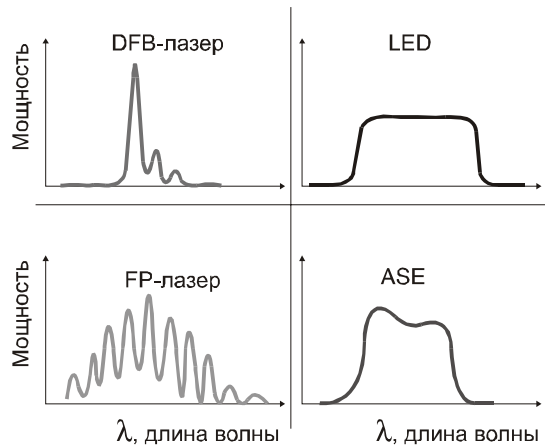


Рис. 3.38 Формы спектра и полосы пропускания светоизлучающего диода LED, лазера с резонатором Фабри-Перо и DFB-лазера сильно различаются между собой

Системы DWDM с каналами с малым частотным интервалом можно использовать только при наличии лазера с узкой линией излучения. Узкая ширина линии минимизирует искажения импульсов, вызываемые дисперсией волокна, и позволяет применять узкополосные фильтры на входе перед приемником для улучшения отношения сигнал/шум. Для того, чтобы сигнал источника не взаимодействовал с другими каналами, требуется также обеспечить очень сильное подавление остаточных боковых полос источника излучения.

Чтобы свести гетеродинный шум до минимума источник излучения должен работать в режиме одной продольной моды. Тенденция к уширению линии излучения (чирпирование) лазеров, модулируемых непосредственно током возбуждения, делает их непригодными для систем DWDM. Предпочтительнее использовать внешние модуляторы, конструктивно объединенные с источником излучения.

Предельная мощность, длина волны максимума излучения и подверженность чирпированию источника излучения должны оставаться в допустимых пределах, как при кратковременном, так и при долговременном его использовании (эффект старения). При этом кратковременные смещения параметров источника излучения из-за влияния температуры и других факторов должны быть незначительными. В противном случае следует дополнять его средствами для обнаружения таких смещений и их компенсации. Лазерные источники должны быть защищены от обратных отражений, так как они могут вызвать нестабильность генерации источника.

Лазерные модули сами по себе довольно дороги и их замена может потребовать сложной и дорогостоящей операции по разборке и последующей перенастройке компонентов, обеспечивающих эффективную работу линии связи. Поэтому, очевидно, что основным требованием является долговременная и стабильная работа источника излучения.

Та часть энергии, которая не преобразуется в световую, в конечном итоге рассеивается в виде тепла и влияет на характеристики лазера (длина волны, мощность) и вызывает

нестабильность. Для поддержания лазерного источника при постоянной температуре обычно используют термоэлектрические холодильники.

Передачик должен оставаться в пределах полосы пропускания канала системы и не менять длину волны излучения со временем. Типичное смещение спектра DFB-лазера не превышает $0,1 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ и $0,01 \text{ нм}/\text{мА}$; чувствительность к изменению температуры корпуса составляет обычно $0,002 \text{ нм}/^\circ\text{C}$, а смещение спектра со временем не превышает $0,001 \text{ нм}/\text{год}$. Выходная мощность источника излучения не должна меняться со временем, а боковые моды необходимо подавлять не хуже чем на 40 дБ относительно пиковой мощности. Лазер оптически изолируют и на него не должны влиять паразитные отражения от среды передачи, особенно возвращающиеся от первого усилителя EDFA в линии связи.

Модулятор должен обеспечить минимальное чирпирование частоты лазера, в идеале меньше, чем ширина полосы частот модуляции (иными словами уширение линии генерации должно происходить только за счет модуляции самого сигнала). А вносимые модулятором потери должны быть минимально возможными.

Далее более подробно рассматриваются важнейшие компоненты передатчика: оптический источник и модулятор.

3.5.1 Оптические передатчики

Оптический источник излучения должен удовлетворять целому ряду условий. Его габаритные размеры должны соотноситься с размерами используемого оптического кабеля (ОК). Для ввода мощности источника в волокно ОК с высокой эффективностью необходимы соответствующие устройства. Наконец, чтобы избежать проблем при сборке системы DWDM, в которой модули передатчиков неизбежно будут расположены очень плотно, источник излучения должен иметь минимальные размеры, малую массу и быть сверхнадежным.

Источник излучения должен выдавать оптический сигнал достаточной мощности, чтобы удовлетворить требованиям по относительному уровню ошибок BER для конкретных приложений, а модуляция его выходного сигнала должна осуществляться с требуемой скоростью. Если выходная мощность источника излучения должна быть переменной или, если применяется аналоговая модуляция, то линейность ватт-амперной характеристики источника излучения выдвигается на первый план.

И светоизлучающий диод LED и лазерный диод LD, в какой-то степени удовлетворяют этим требованиям, однако преимущества лазерного диода по мощности и полосе пропускания однозначно определяют выбор типа источника излучения в системах WDM.

Для источников излучения, используемых в системах передачи со скоростью 2,5 Гбит/с, может быть использована внутренняя модуляция собственным током накачки. Однако, для источников излучения, применяемых при более высоких скоростях передачи, требуются отдельные внешние модуляторы для того, чтобы минимизировать чирпирование частоты. В любом случае, необходимы соответствующие средства, для эффективной передачи выходной мощности источника излучения в следующий компонент системы – модулятор, и далее в линию передачи. Кроме этого, обычно требуются средства контроля за тепловыделением, т.е. термометры.

3.5.2 Модуляторы передатчика

Для передачи информации по линии связи оптическое излучение источника необходимо модулировать. Эта модуляция (в форме прямоугольных импульсов, соответствующих битам информации) должна быть в достаточной степени линейной, чтобы в выходном спектре не появились дополнительные гармоники и интермодуляционные искажения. Такие искажения могут оказать вредное воздействие в каком-то другом месте сети, например, привести к помехам при демодуляции на приемном конце линии связи.

Известно много способов модуляции, однако наиболее распространенным является модуляция интенсивности несущей частоты. При скоростях передачи до 2,5 Гбит/с используется импульсная модуляция тока накачки источника излучения. При более высоких скоростях модуляция интенсивности (включение/выключение) светового сигнала обеспечивается с помощью быстродействующих управляемых оптических затворов.

3.5.3 Стабилизаторы длины волны

Стабилизаторы длины волны – это устройства, вырабатывающие сигнал ошибки с амплитудой пропорциональной сдвигу длины волны лазерного источника излучения от номинального значения канального плана ITU. В основе большинства методов стабилизации используется сравнение уровня оптической мощности излучения, пропускаемого через узкополосные оптические фильтры, полоса пропускания которых охватывает с обеих сторон опорную длину волны.

3.6 ПРИЕМНИКИ

Функция приемника состоит в том, чтобы обеспечить преобразование принятого оптического сигнала в электрический и подать его на демодулятор без внесения дополнительных шумов. Эффективность приемника измеряется относительным уровнем ошибок по битам BER, который он может обеспечить. Для каждого принятого сигнала уровень ошибок BER, в свою очередь, зависит от чувствительности приемника, его полосы пропускания и уровня тех шумов, которые он добавляет к сигналу перед его демодуляцией.

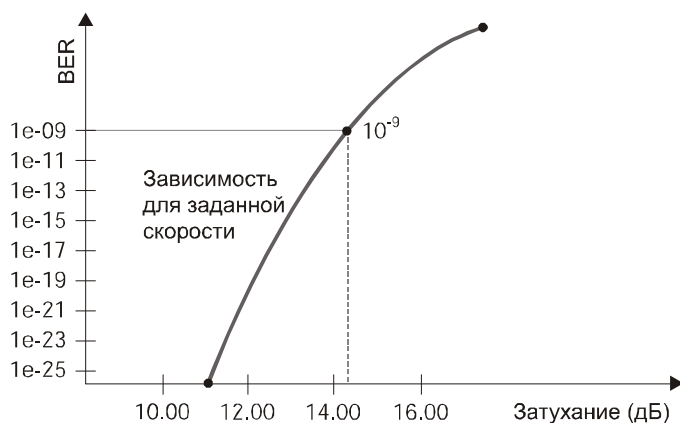


Рис. 3.39 Типичная зависимость относительного уровня ошибок BER от уровня ослабления мощности сигнала (с отмеченным важным значением 10^{-9})

Полная эффективность приемника описывается кривой его восприимчивости, дающей зависимость относительного уровня ошибок BER от уровня принимаемой оптической мощности сигнала при заданной скорости передачи.

Такая зависимость применима только для определенных условий работы приемника и, таким образом, включает в себя влияние полосы пропускания, шумов детектора и способа демодуляции.

Необходимо также учитывать окружающие условия и конструктивные особенности, включая размер, вес, требуемую мощность и приемлемую температурную чувствительность приемника (особенно для лавинных фотодиодов), а также простоту его обслуживания и замены.

3.7 КОМПЕНСАТОРЫ ДИСПЕРСИИ

Ранее мы уже обсуждали влияние хроматической дисперсии на уширение оптических импульсов сигналов по мере их распространения по волокну, а также упоминали компенсацию дисперсии как возможный способ борьбы с этим явлением.

Компенсатор дисперсии зачастую представляет собой просто отрезок оптического волокна, материал которого обладает аномальной хроматической дисперсией на рабочей длине волны. Его дисперсия отрицательная, в то время как среда основного волокна имеет положительную дисперсию. Величина удельной дисперсии компенсатора, приходящаяся на единицу длины, гораздо больше удельной дисперсии основного (компенсируемого) волокна. Это позволяет обходиться относительно короткими отрезками волокна для компенсации дисперсии в обычном волокне на значительных расстояниях, рис. 3.40. Компенсация дисперсии может также осуществляться с помощью дискретных компонентов, таких как брэгговские дифракционные решетки.

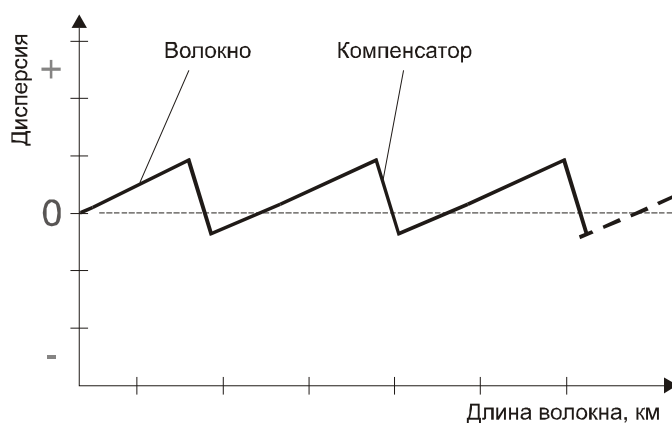


Рис. 3.40 Диаграмма компенсации дисперсии волокна

Чтобы методика компенсации дисперсии была эффективной необходимо уметь измерять как полную дисперсию в основном волокне, так и коэффициент дисперсии корректирующего волокна. Также необходимо иметь возможность проверки того, что компенсирующее волокно расчетной длины действительно устранило дисперсию.

3.8 ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Переключатели применяются в сетях для коммутации линий связи. Они позволяют осуществлять маршрутизацию оптических сигналов и используются при конфигурировании тракта или для восстановления линии связи. Переключатели также применяются в сетях совместно с оптическими мультиплексорами ввода/вывода. Основными параметрами, определяющими характеристики переключателей, а, следовательно, их пригодность для конкретных сетевых применений, являются:

- вносимые потери и потери на стыковку;
- потери на отражение;
- потери, зависящие от поляризации;
- перекрестные помехи и изоляция;
- надежность;
- время переключения;
- стабильность.

3.9 АТТЕНЮАТОРЫ

Основное назначение аттенюаторов в системах WDM – подстроить мощность в каждом канале таким образом, чтобы сигнал, поступающий на первый усилитель EDFA, имел равномерный спектр. Следовательно, равномерность спектра поглощения в пределах ширины канала является важным параметром аттенюатора. Среди других параметров, играющих важную роль в тех или иных приложениях, отметим такие, как:

- стабильность;
- надежность;
- потери на отражение;
- потери, зависящие от поляризации;
- поляризационная модовая дисперсия;
- точность;
- повторяемость;
- вносимые потери.

3.10 ИЗОЛЯТОРЫ

Изоляторы используют в тех случаях, когда рассеянное назад или отраженное оптическое излучение может ухудшить рабочие характеристики чувствительных компонентов системы, таких как DFB-лазер. Оптические свойства используемых материалов и конструктивные особенности изоляторов обеспечивают пропускание оптического излучения при его распространении в одном направлении и сильное его подавление при его распространении в обратном направлении.

Следующие важные параметры определяют характеристики изоляторов :

- Зависимость от длины волны, особенно для узкополосных изоляторов, предназначенных для работы в спектральной полосе менее 20 нм. Изоляторы характеризуются как коэффициентом затухания в обратном направлении (максимальное значение), так и полосой пропускания обратного сигнала по уровню 3 дБ ниже максимального значения.
- Небольшие вносимые потери в прямом направлении (менее 1 дБ), и более 35 дБ (однокаскадный) или 60 дБ (двухкаскадный) для обратного направления при малой зависимости от поляризации.
- Поляризационная модовая дисперсия PMD. Однокаскадные изоляторы выполнены из элементов с высоким двулучепреломлением, в силу чего подвержены PMD (обычно от 50 до 100 фс). Двухкаскадные изоляторы обычно выполнены таким образом, чтобы PMD, появившаяся на первом каскаде, компенсировалась во втором каскаде.
- Потери, зависящие от поляризации PDL, которые ухудшают характеристики оптических изоляторов.
- Дисперсия многолучевой интерференции (дополнительный источник дисперсии, обусловленной паразитными отражениями в устройствах или несбалансированными оптическими путями).

Специалисты, работающие с технологией DWDM, обычно задают конкретные вопросы по измерениям систем DWDM, требующие строгих, прямых ответов. Они интересуются тем, *что* измерять, *как* измерять и *где* измерять. Данная глава является ответом на первый вопрос. Следующая глава, в которой описываются методики измерения характеристик компонентов, служит ответом на второй вопрос. Ответ на последний вопрос будет дан позже в разделе, посвященном установке и вводу систем в эксплуатацию.

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 4

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

4.1 ОБЗОР

Для создания и ввода в эксплуатацию систем передачи данных, использующих технологию плотного волнового мультиплексирования, необходимо обеспечить разработку и производство целого семейства новых компонентов и подсистем. Как и в любой развивающейся технологии, в технологии DWDM были разработаны новая терминология, технические требования к компонентам и методики измерений. В этой главе описаны основные методы тестирования, применяющиеся для измерения характеристик основных сетевых элементов систем DWDM.

В состав компонентов систем DWDM входят:

- передатчики (включая лазеры и модуляторы);
- приемники (включая фильтры и детекторы);
- приемо-передатчики (ретрансляторы, транспондеры);
- оптические усилители (включая усилители мощности, линейные усилители и предусилители);
- мультиплексоры и демультиплексоры;
- оптические мультиплексоры ввода/вывода;
- маршрутизаторы и устройства оптического кросс-коннекта;
- оптические волокна и кабели;
- компенсаторы дисперсии.

По мере развития технологии DWDM частотные интервалы между каналами уменьшаются, эксплуатационные характеристики и требования к компонентам становятся все выше, а процедуры тестирования сложнее.

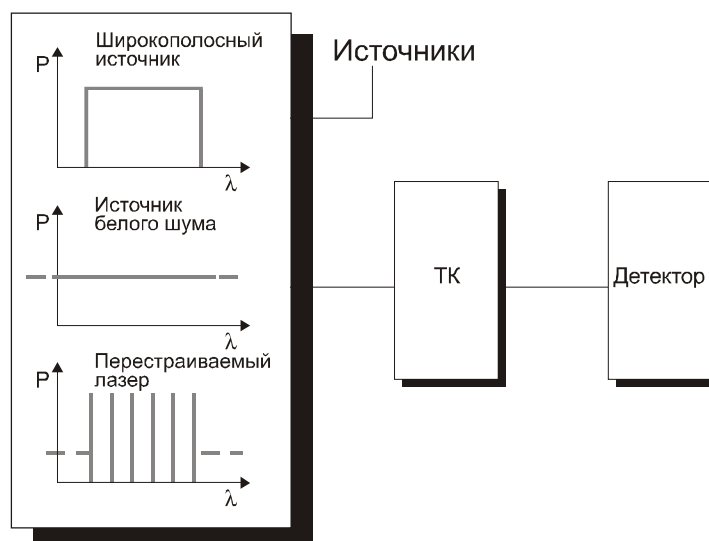


Рис. 4.1 Измерительная установка с идеальными источниками излучения

На тестируемый компонент подают оптический сигнал с известными параметрами, а затем изучают выходной сигнал и определяют, чем он отличается от исходного. Источ-

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

ник излучения и средства анализа выбирают таким образом, чтобы исследовать и анализировать измеряемый параметр тестируемого компонента с минимальным влиянием посторонних воздействий, рис. 4.1.

На практике не существует идеальных источников с бесконечным диапазоном длин волн, излучение которых спектрально чистое и абсолютно стабильное. Не существует и неограниченно перестраиваемых измерительных инструментов, которые имеют абсолютно стабильную калибровку, высокое разрешение и идеальную точность. Специалист, проводящий тестирование, должен тщательно подбирать оборудование и методику измерений, чтобы обеспечить измерение выбранного параметра с требуемой точностью и не внести нежелательных побочных эффектов.

4.2 ОПТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

Выбирая оптический источник для тестирования пассивных компонентов, следует учесть несколько важных моментов. Чтобы провести надежное измерение компонентов с высокими вносимыми потерями, источник должен быть достаточно мощным. Значительный запас мощности потребуется и при тестировании на предельно высоких скоростях передачи устройств, обладающих зависимостью параметров от длины волны, так как при этом потребуется сравнивать несколько сигналов, ослабленных по меньшей мере на 40 дБ.

Для измерений требуются широкополосные источники с достаточно равномерным спектром в рабочем диапазоне, чтобы свести к минимуму коррекцию результатов. Имеющиеся некогерентные широкополосные источники излучения, в том числе с излучением, близким к излучению абсолютно черного тела (лампы накаливания высокой интенсивности, светоизлучающие диоды LED и источники усиленного спонтанного излучения ASE) перекрывают спектральный диапазон, в котором работают компоненты WDM. Так как излучение таких источников не поляризовано или слабо поляризовано, поляризационная зависимость в подобных измерениях мала.

Источники излучения ASE дают свет большой интенсивности в широкой области спектра. Они лучше всего подходят для того, чтобы обеспечить равномерное распределение спектральной мощности в заданном диапазоне длин волн.

В качестве узкополосных источников в большинстве случаев успешно используются лазеры с внешним резонатором ECL (External Cavity Laser). Длина волны излучения такого лазера перестраивается механическим способом с высокой точностью (несколько пм) в спектральном диапазоне, превышающем 120 нм. Лазеры ECL имеют высокую степень поляризации излучения и практически монохроматичны, что обычно необходимо при измерении спектральных характеристик. Спонтанное излучение контролируют, используя подходящие фильтры. Шумовая характеристика лазера ECL вполне подходит для измерений низких уровней вносимых потерь. В настоящее время появились новые разработки перестраиваемых лазеров, в том числе волоконный лазер, объединяющие преимущества технологий EDFA и узкополосной перестраиваемой фильтрации. Они имеют очень низкий уровень шумов для основной линии излучения, сравнимый с уровнем шумов ECL (менее -65 дБ).

Спектральные области, в которых используются указанные типы источников излучения, показаны на рис. 4.2.

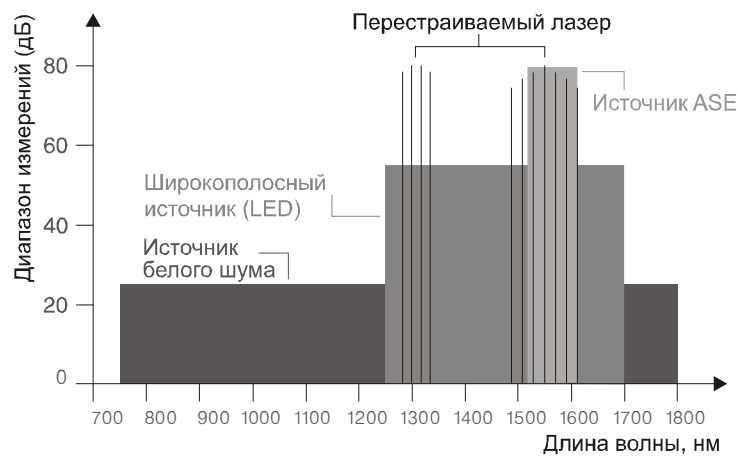


Рис. 4.2 Спектральная область излучения и динамический диапазон источников различных типов

4.3 ПРИЕМНИКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

Тестирование компонентов систем WDM практически всегда связано с определением длины волны и чувствительности устройства к потерям. Поэтому измерительная установка обычно включает либо систему детектирования заданных длин волн для широкополосного источника, либо широкополосную систему детектирования с перестраиваемым лазерным источником.

Требования, предъявляемые к приемникам в задачах тестирования, аналогичны требованиям к источникам. Спектральная характеристика широкополосного приемника излучения должна быть однородной, отклик приемника – линейным в максимально возможном динамическом диапазоне, а вносимый при измерении уровень шумов – минимальным. Желательно также, чтобы поляризационная чувствительность была как можно меньше.

4.3.1 Измерители мощности излучения

В широкополосных оптических измерителях мощности чаще всего используются фотодиоды, имеющие высокую спектральную чувствительность в стандартном диапазоне длин волн. При этом могут использоваться сменные модули для переключения зон приема. Они имеют гладкую и достаточно равномерную зависимость отклика от длины волны (в особенности фотодетекторы на основе InGaAs). Для обеспечения высокой точности измерений на произвольной длине волны фотодиоды обычно калибруют. Измерители мощности (особенно модели с термоэлектрическими охладителями) имеют высокую стабильность и динамический диапазон, необходимый для большинства случаев измерения потерь, а также малую чувствительность к поляризации.

4.3.2 Анализаторы оптического спектра

На рис. 4.3 (а, б, в) показаны некоторые способы выделения длин волн, которые используются для анализа оптического спектра.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

В основе первого способа лежит интерференция двух пучков входного излучения. Эти пучки проходят по разным оптическим плечам интерферометра Майкельсона (фиксированной и переменной длины), и интенсивность света на выходе интерферометра меняется из-за перемещения зеркала. Попадая далее на фотодетектор, свет преобразуется в электрический сигнал, анализ которого с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяет получить спектр исходного сигнала.

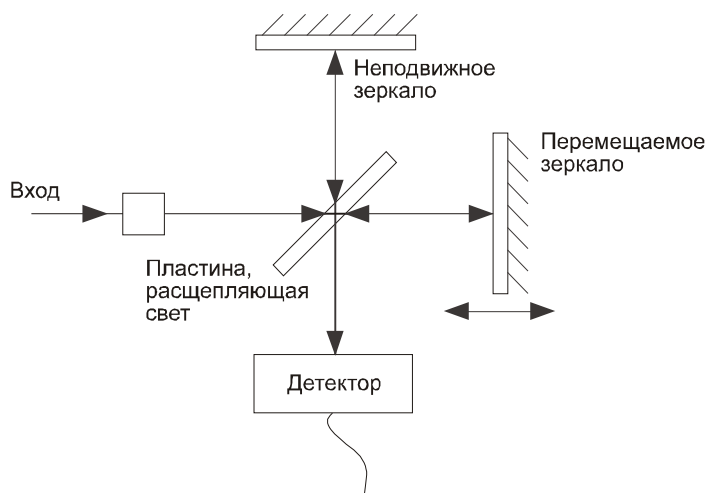


Рис. 4.3, а. В интерферометрическом методе для интерференции двух пучков света используется перемещаемое зеркало.

В другом подходе (рис. 4.3, б) используется дисперсионная решетка, отражающая лучи под разными углами в зависимости от длины волны. При повороте решетки происходит сканирование всех длин волн, присутствующих в спектре входного сигнала, через выходную щель прибора. Для увеличения разрешения используется двойной проход оптического пучка через систему.

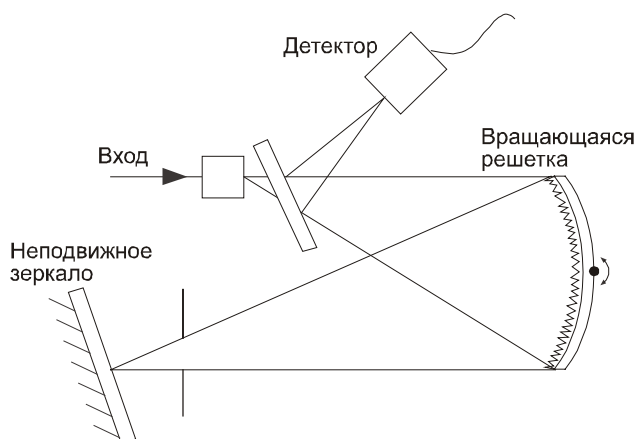


Рис. 4.3, б. Вращающаяся дисперсионная решетка отражает на зеркало излучение с разными длинами волн в зависимости от угла поворота

Третий способ (рис. 4.03, с) аналогичен только что рассмотренному, но в данной конструкции решетка закреплена. Отраженные решеткой спектральные составляющие входного пучка распределяются по линейке отдельных фотодетекторов (или попадают на одиночный перемещаемый фотодетектор).

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

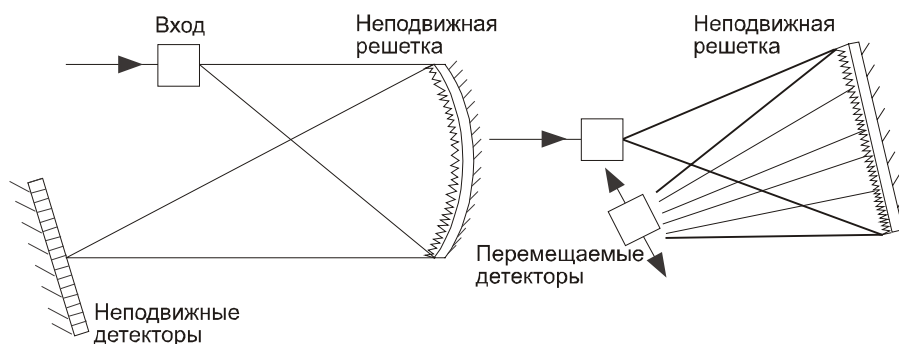


Рис. 4.03, с. Фиксированная решетка разделяет входной пучок на спектральные составляющие, которые затем попадают на детекторы

Перечислим важнейшие характеристики анализатора оптического спектра:

- Динамический диапазон – определяет возможность измерения амплитуд сигналов в широком диапазоне. Большой динамический диапазон может потребоваться, например, при исследовании полосы пропускания оптического канала, когда могут быть важны аномальные характеристики боковой полосы, уровень мощности которой ниже уровня основного сигнала более чем на 50 дБ.
- Чувствительность – способность измерять оптические сигналы маленькой интенсивности.
- Разрешение по полосе пропускания RBW (Resolution Bandwidth) – возможность различения близко расположенных длин волн, которая необходима для исследования спектральной структуры каналов систем DWDM. RBW приобретает все большее значение с увеличением числа используемых каналов в прежнем волновом диапазоне.
- Точность – возможность точно и правильно измерять длины волн и мощность.

Первые две характеристики зависят в основном от используемого детектора, следовательно, выбирая детектор, можно частично удовлетворить требованиям конкретного измерения.

Важным достоинством анализаторов OSA, использующих дифракционные решетки, является их высокое спектральное разрешение. Современный уровень производства позволяет изготавливать решетки со спектральным разрешением достаточным для тестирования систем DWDM. В тоже время абсолютная точность измерений является ахиллесовой пятой таких анализаторов: калибровка абсолютной длины волны зависит от положения множества механических компонентов – в частности углового положения решетки – поэтому трудно гарантировать стабильные результаты. Пример одной из форм внешней калибровки – использование узких линий поглощения ацетилен. Она обычно используется при приведении собственных высокоточных значений анализатора OSA к внешним опорным значениям. Другой способ калибровки заключается в точном определении длин волн перестраиваемого лазера при помощи измерителя длины волны. Затем этот лазер (например, лазер ECL с узкой линией излучения) используется для калибровки анализатора.

Хотя параметры конструкции, обеспечивающие эффективность анализатора OSA, можно в какой-то степени подобрать, чтобы удовлетворить требованиям конкретного

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

измерения, все характеристики OSA сильно взаимосвязаны между собой. Например, увеличение спектрального разрешения подразумевает использование дифракционной решетки с высокой дисперсией или выделение рассеянного света через узкую щель – в обоих случаях уменьшается количество собираемого света (в том случае, если сигнал имеет такую же или большую полосу пропускания). Модулированные сигналы могут также уменьшить чувствительность и, во многих случаях, динамический диапазон.

4.3.3 Измерители длины волны

Измеритель длины волны представляет второй тип приемника с избирательностью по длинам волн. По сути, он является интерферометром Майкельсона, рис. 4.3, а. Перемещение зеркала в опорном плече интерферометра приводит к изменению картины интерференции двух пучков света. При этом результирующий сигнал на фотодетекторе изменяется синусоидально для входного монохроматического светового пучка, а для пучка с несколькими длинами волн - по более сложному закону. Чтобы получить спектр входного оптического сигнала, электрический сигнал на выходе фотодетектора обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье.

Измеритель длины волны по характеристикам сопоставим с анализатором OSA, однако их сильные и слабые стороны полностью различаются. Во-первых, измеритель длины волны полностью использует всю энергию источника, а потому измерения в спектральном диапазоне (или на нескольких разных длинах волн) с помощью измерителя длин волн выполняются одновременно, в отличие от OSA (детектор OSA в каждый момент времени наблюдает лишь за небольшой спектральной зоной). Измеритель длины волны удобен для масштабного, быстрого тестирования каналов. Точная информация об относительной длине волны извлекается из сигнала методами БПФ, а привязка к абсолютной длине волны производится по встроенному в прибор гелий-неоновому (He-Ne) лазеру. Таким образом, в итоге абсолютная точность измерений довольно высока (лучше, чем 0,005 нм), чего вполне достаточно для исследования спектрального распределения каналов, например, в 80-канальных системах WDM.

Измеритель длин волн имеет ограниченный динамический диапазон измерений (чуть больше 30 дБ), чего недостаточно для полного описания характеристик каналов системы DWDM, а также низкую чувствительность к слабым сигналам. Тем не менее, высокая точность измерения длин волн и возможность одновременной регистрации всех длин волн полосы пропускания делают его весьма полезным дополнением к анализатору спектра OSA. Измерители длин волн со встроенным эталоном абсолютной длины волны предназначены для измерений, требующих частой калибровки.

4.4 ТИПОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ

Существует много способов объединения широкополосных и перестраиваемых источников и приемников для измерения зависимости параметров компонентов систем DWDM от длины волны, рис. 4.4. Ниже на примере многосторонней задачи тестирования мультиплексора (демультиплексора) рассмотрены наиболее распространенные конфигурации.

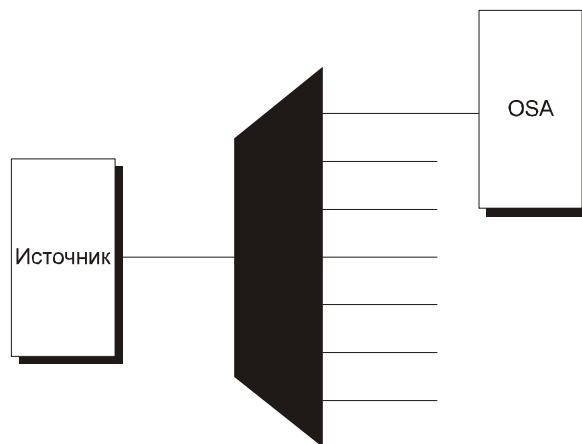


Рис. 4.4 Вслед за демультиплексором для исследования его характеристик размещают анализатор OSA

Сначала сформулируем некоторые общие принципы. Если в паре приборов источник/приемник только один из них является узкополосным, то, очевидно, что этот элемент определяет итоговое спектральное разрешение. Если же оба прибора узкополосные, то любой из них может повлиять на окончательное разрешение в зависимости от методики измерения.

4.4.1 Мультиплексоры/демультиплексоры

Мультиплексоры и демультиплексоры являются основными компонентами систем DWDM, поэтому их полоса пропускания, уровень перекрестных помех, вносимых потерь, потерь на отражение, степень изоляции и поляризационные характеристики являются важнейшими параметрами, определяющими эффективность работы системы. В данном разделе описаны процедуры тестирования этих параметров для мультиплексоров/демультиплексоров (те же процедуры используются для тестирования аналогичных параметров других оптических компонентов).

Вносимые потери

На рис. 4.5 изображена типовая установка для определения вносимых потерь мультиплексора/демультиплексора. На вход мультиплексора/демультиплексора подают сигнал широкополосного источника ASE, спектр которого равномерен и покрывает рабочую полосу устройства. Выходной сигнал, поступающий в анализатор OSA, непосредственно отображает форму кривой вносимых потерь. Относительные значения потерь можно привести к абсолютным, выполнив необходимые опорные измерения – для этого источник подключают напрямую к OSA. Спектральное разрешение измерения в этом

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

случае ограничено разрешением анализатора (OSA RBW) и формой его полосы пропускания. Чтобы облегчить или автоматизировать тестирование многоканальных устройств, используется оптический переключатель $1 \times N$. Все компоненты измерительной системы должны обладать низкой чувствительностью к состоянию поляризации светового сигнала.

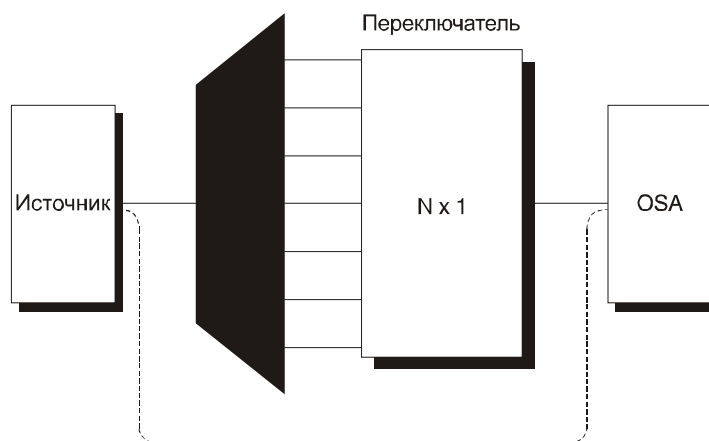


Рис. 4.5 Сигнал от источника ASE проходит через мультиплексор и исследуется анализатором OSA на каждом выходном порту (с помощью оптического переключателя)

Измерение потерь PDL методом сканирования

Используя аналогичную конфигурацию – широкополосный источник и анализатор OSA – можно измерить спектр потерь, зависящих от поляризации (PDL). Анализатор должен выполнить несколько циклов сканирования при разных случайным образом выбранных состояниях поляризации. Разница между минимальными и максимальными измеренными значениями и составляет потери PDL. Их подсчет обычно выполняет специальная прикладная программа. Итоговая точность измерения тем выше, чем больше число циклов сканирования.

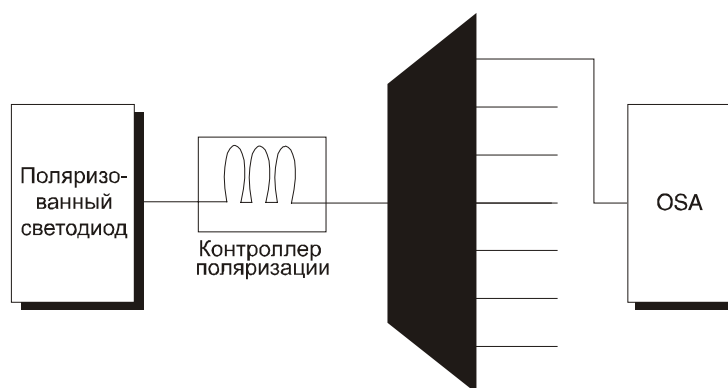


Рис. 4.6 Для измерения потерь PDL в схему добавлен преобразователь поляризации

Потери PDL также часто измеряют с помощью монохроматического источника излучения, преобразователя поляризации и анализатора OSA либо измерителя мощности, рис. 4.6. Преобразователь поляризации быстро случайным образом меняет состояние поляризации сигнала. OSA или измеритель мощности сравнивает уровень посланного оптического сигнала с уровнем сигнала, прошедшего через тестируемый компонент. Для

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

заданной длине волны источника, можно одновременно определить потери PDL и вносимые потери за 2-5 сек в зависимости от требуемого уровня достоверности.

У многих компонентов систем DWDM (например, фильтров и брэгговских решеток) необходимо также измерять зависимость потерь PDL от длины волны. Для этого постоянный источник в рассмотренной конфигурации заменяют на перестраиваемый лазерный источник.

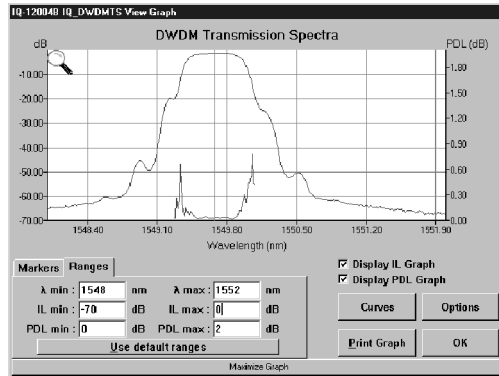


Рис. 4.7 Наблюдение спектральной зависимости потерь PDL мультиплексора для отдельного канала

Значения потерь PDL для многих компонентов DWDM чаще всего очень малы, поэтому особое внимание следует уделять компенсации потерь PDL, вносимых самими измерительными приборами. Модули для измерения PDL обычно включают опорный канал, что избавляет от необходимости проводить компенсацию вручную.

Измерение потерь PDL методом Мюллера-Стокса

Оптический сигнал можно представить в форме вектора Стокса S . Четыре компонента этого вектора (S_0, S_1, S_2, S_3) можно определить, пропуская сигнал через волновые пластины с различными поляризационными характеристиками и измеряя его мощность, рис. 4.8.

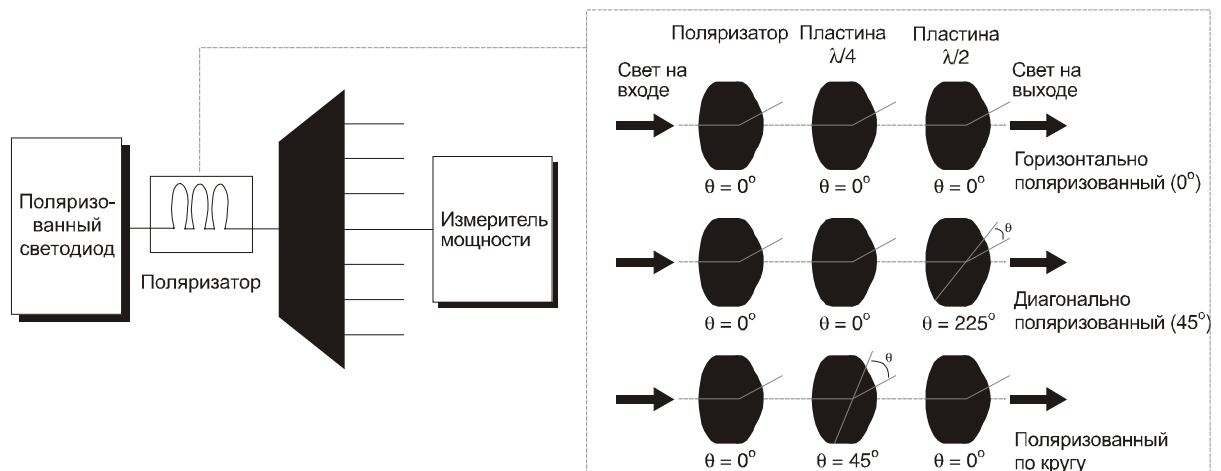


Рис. 4.8 Для получения различных состояний поляризации используют три разные волновые пластины

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

При прохождении излучения через любой компонент системы DWDM вектор Стокса определенным образом изменяется. Воздействие компонента на поляризованный свет может быть математически описано с помощью 4×4 матрицы Мюллера \mathbf{M} :

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}\mathbf{S}$$

где \mathbf{S} – вектор Стокса входного сигнала, \mathbf{S}' – вектор Стокса выходного сигнала.

С помощью метода Мюллера-Стокса потери PDL можно вычислить без непосредственного вычисления векторов Стокса входного и выходного сигнала. Для этого вначале с помощью контроллера поляризации и измерителя мощности выполняют измерения мощности четырех различных состояний поляризации (линейное горизонтальное 0° , линейное вертикальное 90° , линейное диагональное 45° , круговое правостороннее) оригинального (входного) сигнала. После этого между контроллером поляризации и детектором подключают тестируемый компонент и выполняют аналогичные измерения для выходного сигнала. На основе этих измерений вычисляют максимальный и минимальный коэффициенты передачи T (transmission coefficient) по всему пространству Стокса (без перебора всех возможных входных состояний поляризации). Потери PDL (измеряются в дБ) определяются как:

$$PDL = 10 \lg(T_{\min} / T_{\max})$$

Этот метод отличают быстрота измерений и невысокая цена оборудования. Если использовать перестраиваемый лазер в режиме сканирования длины волны, то можно измерять зависимость PDL от длины волны. Метод Мюллера-Стокса чувствителен к изменению положения соединительных шнуров. Метод Мюллера-Стокса идеально подходит для систем автоматического тестирования (раздел 4.5), рис. 4.9.

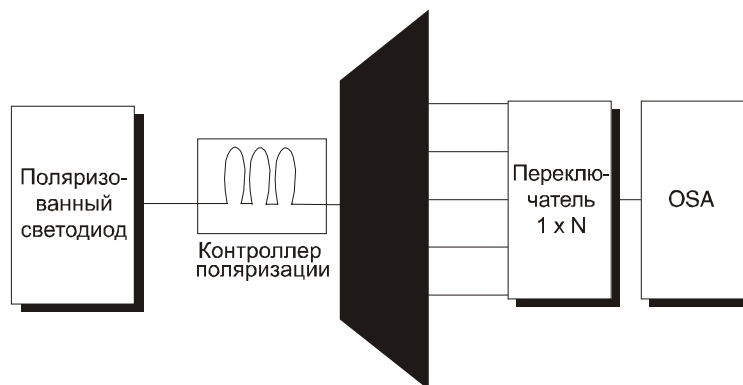


Рис. 4.9 Схема измерения поляризационно-зависимой ширины полосы пропускания

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Аналогично измеряют поляризационно-зависимую ширину полосы пропускания PDBW (Polarization Dependent Bandwidth). Эта спектральная характеристика оптического фильтра определяется как разница между максимальной и минимальной шириной полосы пропускания измеряемого канала по всем возможным состояниям поляризации, рис. 4.10.

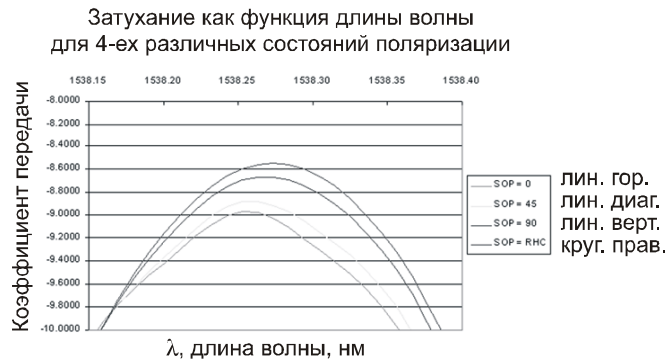


Рис. 4.10 Зависимость ширины полосы пропускания от поляризации

$$PDBW = BW_{\max} - BW_{\min}$$

Точность измерений PDBW возрастает с увеличением числа исследованных состояний поляризации. На практике ограничиваются непрерывным измерением в течение нескольких минут.

Точно так же измеряют зависимую от поляризации центральную длину волны PDCW (Polarization Dependent Central Wavelength) – она определяется как максимальная разница между центральными длинам волн полос пропускания измеряемого канала по всем возможным состояниям поляризации, рис. 4.11. Некоторые компоненты обладают очень большими значениями PDCW (1 нм и больше), что ограничивает их применимость в системах DWDM.



Рис. 4.11 Зависимость центральной длины волны от поляризации

Перекрестные помехи

Чтобы измерять перекрестные помехи между каналами DWDM, источник ASE, использовавшийся в предыдущих схемах измерений, заменяют на узкополосный перестраиваемый лазерный источник. Далее пошагово изменяют длину волны излучения

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

перестраиваемого источника (на величину волнового разрешения) и на каждом шаге сканируют анализатором OSA все каналы мультиплексора/демультиплексора. Измерения повторяются до тех пор, пока не будет исследован весь заданный диапазон длин волн. Разрешение измерения определяется шагом перестройки лазера, а не спектральным разрешением анализатора, и кривая потерь может быть определена с разрешением лучше 0,001 нм в большом динамическом диапазоне, рис. 4.12, а. Эта измерительная процедура занимает очень много времени, особенно при тестировании многоканальных компонентов; ускорить ее можно, используя вместо OSA многоканальные измерители мощности, рис. 4.12, б. Для калибровки следует использовать измеритель длин волн.

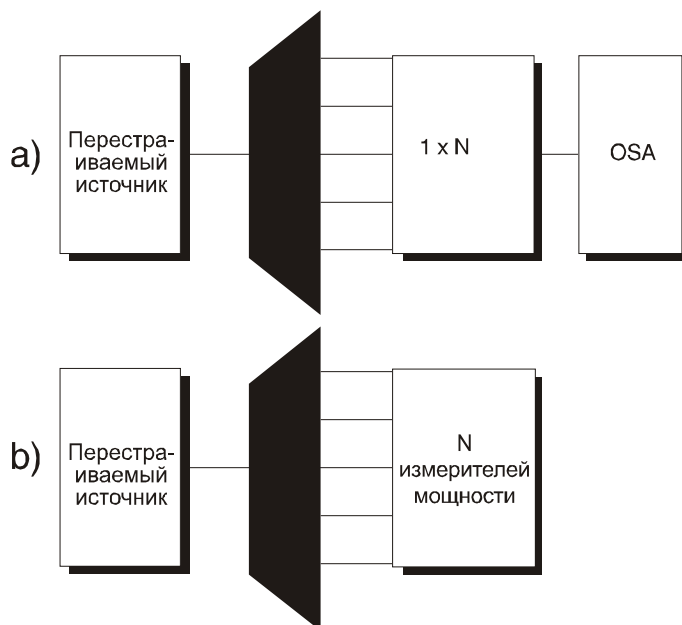


Рис. 4.12 Перекрестные помехи измеряют с помощью:
а) перестраиваемого лазера с анализатором OSA или
б) перестраиваемого лазера с измерителями мощности

Потери на отражение

Оптические потери на отражение ORL (Optical Return Loss) измеряются с помощью источника излучения, разветвителя и фотодетектора, часто называемого измерителем обратного отражения OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometer). На этапе калибровки вместо тестируемого компонента подключают компонент с известным коэффициентом отражения; после чего в измерительную схему вводят сам тестируемый компонент. К измеренной детектором отраженной мощности применяют поправочный коэффициент, найденный на этапе калибровки, и получают значение ORL. Такая схема измерения с мощным, некогерентным оптическим источником и чувствительной системой детектирования высокого разрешения позволяет обнаружить ORL на уровне -70 дБ и ниже.

ORL могут зависеть от длины волны. Чтобы определить эту зависимость, в рассмотренной измерительной конфигурации используют мощный, перестраиваемый лазер с умеренной степенью когерентности либо широкополосный источник (лазер ASE); при этом анализатор OSA используют в качестве детектора, рис. 4.13. Однако из-за ограниченного динамического диапазона OSA трудно проследить волновую зависимость ORL при уровне ниже -40 дБ.

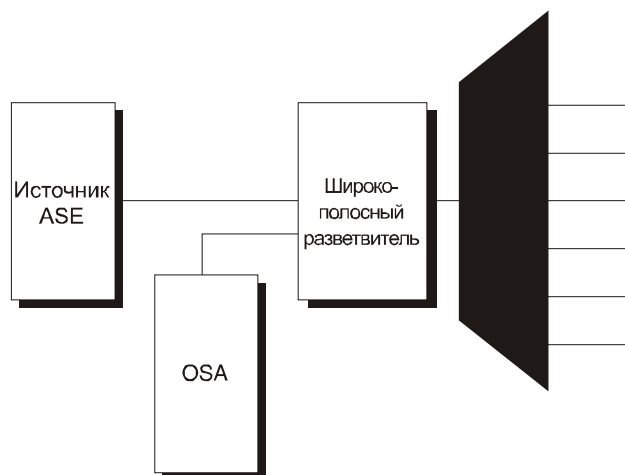


Рис. 4.13 Измерение зависимости ORL от длины волны

Полоса пропускания

Для измерения оптической полосы пропускания используется процедура, аналогичная процедуре измерения вносимых потерь. От спектральной характеристики самой измерительной системы можно избавиться при помощи опорного измерения. На рис. 4.14 показана типовая измерительная установка.

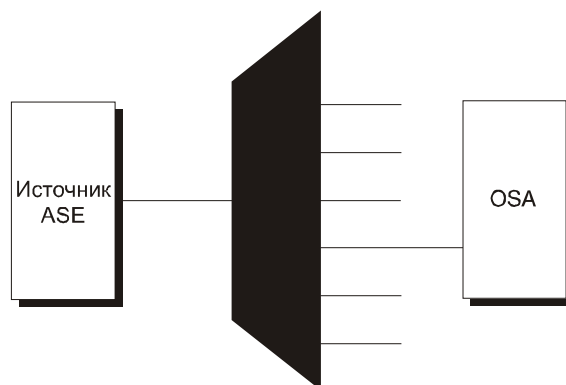


Рис. 4.14 С помощью простой схемы измерений, использующей источник ASE и анализатор OSA, определяют характеристики полосы пропускания

Если необходимо точно определять боковые полосы пропускания (например, со спектральным разрешением лучше 0,1 нм), то необходимо использовать другую схему измерений, использующую перестраиваемый источник и измеритель мощности или анализатор OSA, рис. 4.15. В этой схеме спектральное разрешение ограничено точностью перестройки длины волны излучения источника (обычно около 0,01 нм) и степенью подавления боковых полос перестраиваемого источника излучения. Чувствительность определяется чувствительностью измерителя мощности (~ -100 дБм).

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

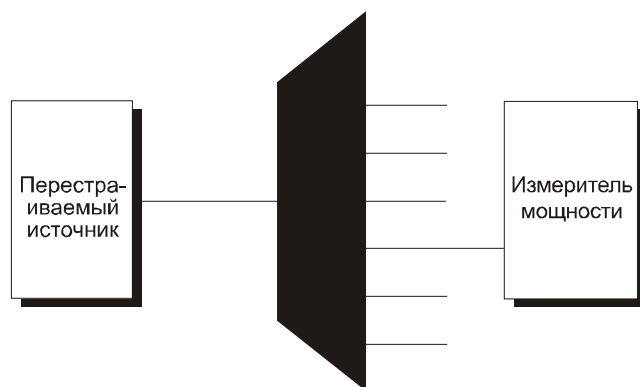


Рис. 4.15 Альтернативная схема измерения характеристик полосы пропускания с перестраиваемым источником и измерителем мощности излучения

Во многих рассмотренных схемах измерений используется одно и то же тестовое оборудование, что облегчает автоматизацию тестовых процедур.

В конфигурации, изображенной на рис. 4.16, используется малошумящий перестраиваемый лазерный источник TLS (Tunable Laser Source). Его длину волны перестраивают в заданном диапазоне длин волн, и одновременно с этим с помощью многоканального измерителя мощности измеряют мощность сигналов в каждом канале тестируемого компонента. Время измерений не зависит от числа каналов устройства, что удобно для автоматизации тестирования многоканальных компонентов. Если в схему измерений включить оптический переключатель (см. верхнюю часть схемы), то во время текущего измерения можно готовить к тестированию другие компоненты.

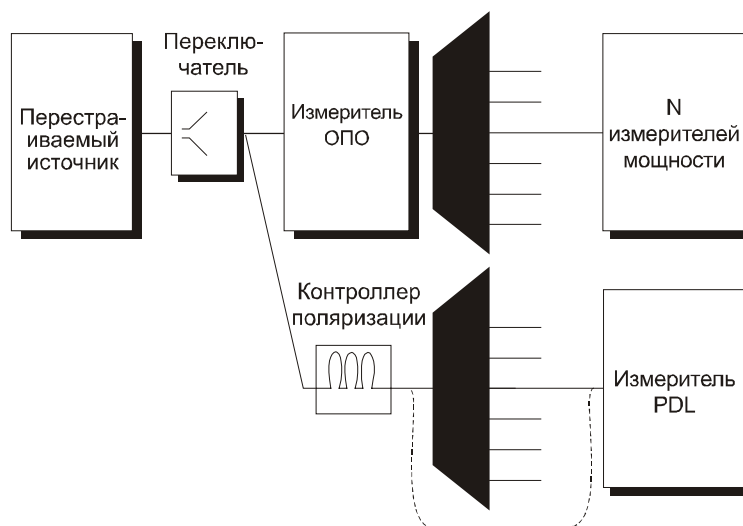


Рис. 4.16 Автоматизированная установка для измерения вносимых потерь PDL и оптических потерь на отражение

Спектральное разрешение измерения определяется характеристиками перестраиваемого лазерного источника, а динамический диапазон измерений – спонтанным излучением (или шумом) источника, динамическим диапазоном и чувствительностью измерителя мощности излучения. Использование источника TLS (например, лазера на волокне) позволяет легко достичь динамического диапазона более 65 дБ. На схеме показано, как измерения потерь ORL и PDL можно объединить в одной конфигурации.

При таком размещении оборудования достаточно просто добавить дополнительные измерители мощности излучения для измерения параметров многоканальных компонентов.

Поляризационная модовая дисперсия

Для измерения PMD используют четыре основных метода: анализ матрицы Джонаса JME (Jones Matrix Eigenanalysis), метод сферы Пуанкаре PSA (Poincaré Sphere Analysis), метод сканирования длин волн WSFA (Wavelength-Scanning/Fixed-Analyzer) и интерферометрический метод IM (Interferometric Method). JME и PSA являются поляриметрическими (волновыми) методами и позволяют наблюдать функциональную зависимость дифференциальной групповой задержки DGD от длины волны. Методы IM и WSFA предназначены для измерения PMD во временной области и подходят для тестирования широкополосных устройств. Существуют и другие методы (например, модуляция сдвига фазы), которые будут рассмотрены более подробно в следующих главах, посвященных явлению PMD в оптическом волокне.

4.4.2 Переключатели

Для тестирования оптических переключателей используются источник излучения, многоканальный измеритель мощности излучения и подходящий контроллер переключателя, рис. 4.17.

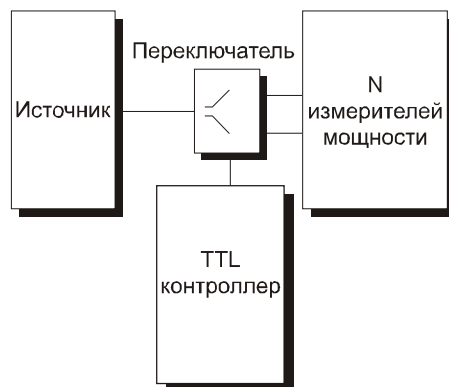


Рис. 4.17 Высокоскоростные измерители мощности излучения позволяют тестировать современные переключатели

Для измерения скорости переключения необходим измеритель мощности с высокой скоростью АЦП и быстрой стабилизацией. Чтобы автоматизировать измерения, измеритель мощности должен идентифицировать наличие оптического сигнала на выходах переключателя и подавать на переключатель управляющие электрические сигналы. Высокая скорость АЦП и быстрая стабилизация требуются также для устройств, с помощью которых определяется предельная скорость переключения и уровень перекрестных помех.

Во многих случаях важно знать такие характеристики переключающих элементов, как потери, перекрестные помехи и переходные характеристики. Контрольная аппаратура, используемая для их тестирования, должна иметь большие динамические диапазоны при высоких скоростях измерений.

4.4.3 Оптические источники

Центральная длина волны и мощность излучения на выходе лазерных диодов являются важными параметрами систем WDM, поэтому производителям необходимы автоматические (или, по крайней мере, полуавтоматические) методы измерения этих параметров. Для этого используются волновые измерители и высокоскоростные измерители мощности излучения с большой скоростью выборки и соответствующие оптические переключатели.

На рис. 4.18 приведена конфигурация измерительной системы для быстрого сканирования зависимости выходной мощности от входного тока лазера сразу для четырех устройств при помощи четырехканального измерителя мощности. Повторное измерение длины волны при одном или нескольких заданных уровнях мощности можно обеспечить с помощью оптического переключателя 1×4 .

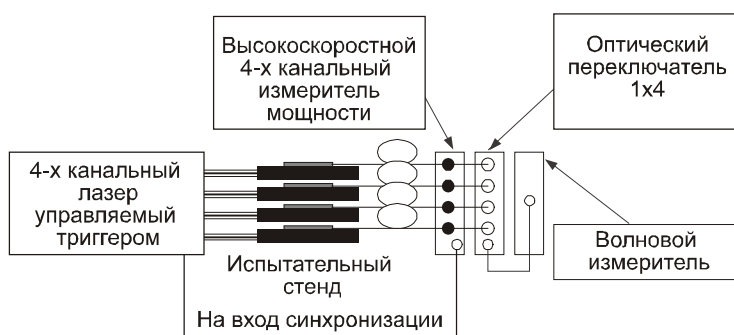


Рис. 4.18 Измерение характеристик лазерного источника

Последовательность измерений:

1. Управляющий триггер сигнализирует о начале нарастания тока, подаваемого на все лазеры, срабатывая чуть ниже ожидаемого порога генерации лазера.
2. Этот же триггер задает начало измерения мощности входных каналов. Если скорость нарастания управляющего тока постоянна, то выходную мощность в любой момент времени можно точно сопоставить с линейно меняющимся входным током на протяжении всего цикла сканирования. Используя быстродействующие измерители мощности, можно снимать несколько тысяч показаний в секунду, что обеспечивает достаточное разрешение в пороговой области, несмотря на малое время измерений.
3. После определения зависимости выходной мощности излучения от тока (кривая L-I) устройство, управляющее током лазера, задает уровень тока для каждого канала немного выше порога генерации (рабочий уровень мощности). После этого можно точно измерить длину волны при помощи волнового измерителя.

Для определения потерь PDL стабилизатора длины волны (см. главу 2) используются перестраиваемый лазерный источник, длину волны излучения которого можно менять во всем диапазоне частотного плана ITU-T, и преобразователь поляризации для изменения поляризации излучения источника (во всем пространстве возможных состояний поляризации). Максимальное изменение сигнала ошибки по всем состояниям поляризации указывает на поляризационную зависимость стабилизатора (в процентах или в дБ).

Стабилизатор длины волны должен выдерживать длину волны с очень высокой точностью, обеспечивая ее соответствие стандартному частотному плану ITU. Для определения характеристик стабилизатора обычно используется измеритель длин волн.

4.4.4 Приемники

Полупроводниковые фотодетекторы входят в режим насыщения с увеличением входной мощности, поэтому необходимо тестировать их линейность. Смещение p-i-n перехода улучшает линейность приемника, но увеличивает шум темнового тока, что ограничивает измерение слабых сигналов. Различные меры, предпринимаемые для увеличения динамического диапазона (предусилители с высоким входным сопротивлением, автоматические цепи управления усилением или автоматический выбор постоянных шагов усиления), увеличивают нелинейности, особенно для сигналов малой мощности или в схемах усиления с дискретным шагом.

На рис. 4.19 показана типовая конфигурация для измерения нелинейностей методом суперпозиции. Эту схему можно легко автоматизировать.

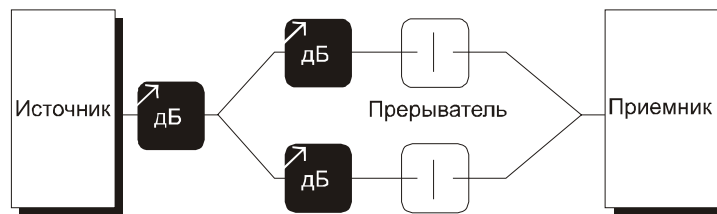


Рис. 4.19 Автоматизированная схема определения временных характеристик и чувствительности приемника

4.4.5 Усилители EDFA

Прежде чем оптический усилитель на волокне, легированном эрбием EDFA, можно будет использовать в системе DWDM, необходимо определить ряд его характеристик. В первую очередь, это коэффициент усиления для каждого канала. Во-вторых, это равномерность усиления – необходимо выровнять коэффициент усиления так, чтобы обеспечить одинаковое усиление оптических сигналов во всех каналах. Усиление в пределах каждого канала также должно быть равномерным. Кроме того, требуется определить усиление слабых сигналов по всей полосе пропускания, рис. 4.20.

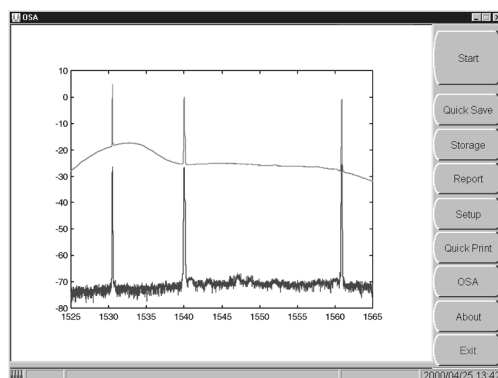


Рис. 4.20 Пример усиления оптического сигнала

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Явление усиления спонтанного излучения вызывает шум в усилителе EDFA, поэтому нужно исследовать шум во всем рабочем диапазоне усилителя и определить отношение сигнал/шум для каждого канала. Требуется также провести измерение чувствительности EDFA к обратным отражениям (от устройств ниже по линии связи), а также общих поляризационных параметров PMD, PDL и PDG (Polarization Dependent Gain).

Чтобы определить АЧХ EDFA, к его входу через регулируемый аттенюатор подключают перестраиваемый лазерный источник. На выходе EDFA размещают измеритель мощности излучения (на основе InGaAs или Ge детектора), способный измерять уровень мощности до +25 дБм. При использовании германиевого детектора в зоне 1550 нм следует предпринять дополнительные меры предосторожности, так как его спектральная чувствительность в этом диапазоне резко меняется. Усиление слабых сигналов измеряют на каждой длине волны. Для этого предварительно уменьшают мощность входного сигнала с помощью регулируемого аттенюатора до -30 дБм, после чего повышают и непрерывно следят за уровнем усиления, отмечая момент, при котором усиление ослабевает на 3 дБ. Это – так называемая точка спада, которая обычно задает предельную рабочую входную мощность.

Рассмотренное измерение лишь частично описывает полную амплитудно-частотную характеристику усилителя, так как не принималось во внимание “перераспределение усиления”, возникающее при наличии сигнала во всех каналах. Однако полученных рабочих характеристик усилителя вполне достаточно для оценки бюджета потерь системы.

Чтобы получить более полное описание АЧХ, в схему измерений включают несколько источников излучения, которые симулируют предельную ожидаемую загрузку каналов. Выходной сигнал EDFA можно исследовать многоканальным измерителем мощности, анализатором OSA или волновым измерителем. Процедура, изложенная выше для одиночного источника, выполняется поочередно для каждого канала. Во все остальные каналы, кроме измеряемого в данный момент, должна быть подана типовая для планируемых рабочих условий мощность.

В некоторых случаях важно знать потери, вносимые EDFA в холостом режиме, т.е. без лазерной накачки. Зависимость этих потерь от длины волны можно измерить широкополосным источником (LED или ASE лазер) совместно с детектором OSA. Измерительное оборудование и процедура тестирования такие же как при измерении АЧХ, а результат указывает на ожидаемые потери в случае выхода тестируемого усилителя из строя. Типичный результат приведен на рис. 4.21.

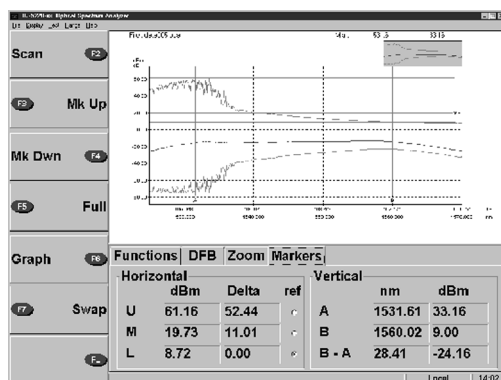


Рис. 4.21 Изображение вносимых потерь с результатами для входного и выходного сигналов

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Так как в модуль усилителя EDFA входят фильтры, циркуляторы или другие компоненты, то потери на отражение часто зависят от длины волны. Для получения спектральной характеристики ORL можно использовать перестраиваемый лазерный источник совместно с измерителем обратных потерь. Оба прибора подключают ко входу EDFA, причем усилитель находится в холостом режиме, рис. 4.22,а.

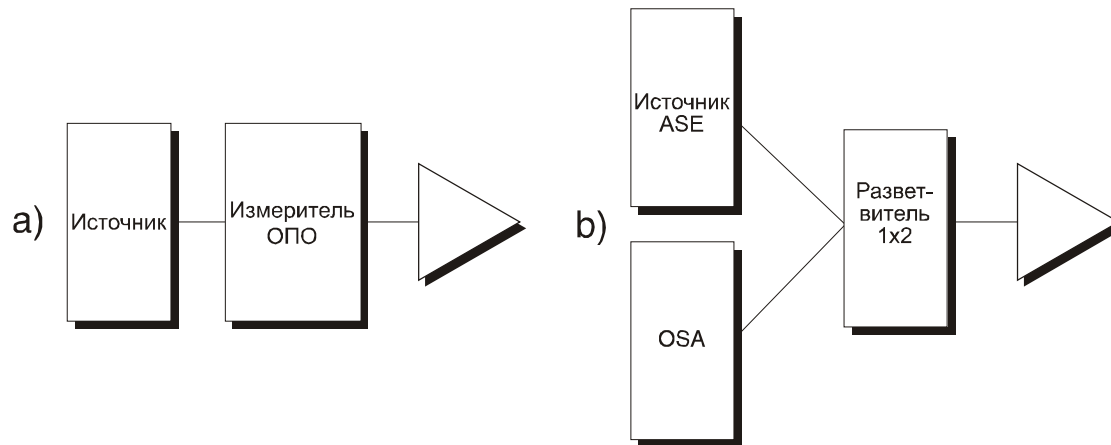


Рис. 4.22 Два варианта установок для измерения ORL

В альтернативной схеме используют широкополосный источник (например, источник ASE), анализатор OSA и разветвитель 1×2 , рис. 4.22, б.

Чтобы полностью описать поведение EDFA, усиливающего несколько каналов, следует учесть свойство взаимозависимости усиления на разных каналах, которая проявляется в большей или меньшей степени на тех или иных участках зоны усиления EDFA. При работе EDFA распределяет свою мощность по всем подаваемым на его вход каналам. Так как мощность излучения на выходе EDFA постоянна, то при удалении одного из входных каналов мощность, которую EDFA тратил на усиление этого канала, распределится по оставшимся каналам. В связи с этим необходимо контролировать усиление в каждом из оставшихся каналов, для того чтобы сохранить требуемый уровень сигнала в каждом канале. Перераспределение усиления слегка меняется в зависимости от того, какой канал был удален, так как спектральный состав входного сигнала не является идеально равномерным.

На рис. 4.23 показана установка для измерения этого эффекта. Сигналы от разных источников приходят по одному на каждый входной канал мультиплексора, объединяются в один, который, пройдя через регулируемый аттенюатор с равномерной АЧХ, подается на вход усилителя. Аттенюатор используется для ослабления полной мощности сигнала до нужного уровня. Выходной сигнал усилителя анализируется OSA. Перераспределение АЧХ EDFA и обеспечиваемая им стабильность равномерности спектра измеряются путем поочередного отключения лазерных источников.

Данный тип измерений легко автоматизируется: имеются модули как для выполнения необходимых измерений, так и для анализа результатов.

Обратное отражение – еще один потенциально опасный фактор для усилителей EDFA.

Каждый активный элемент сети приводит к возникновению такого явления, как обратное отражение: часть мощности сигнала отражается от компонентов, расположенных

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

дальше по пути передачи сигнала в канале связи. Отраженная энергия может влиять на такие параметры, как: долговременная стабильность мощности, стабильность длины волны, спектральное уширение и многолучевая интерференция. Хотя обратные отражения в основном негативно воздействуют на EDFA, измерения аналогичные приводимым ниже иногда выполняют и для других устройств.

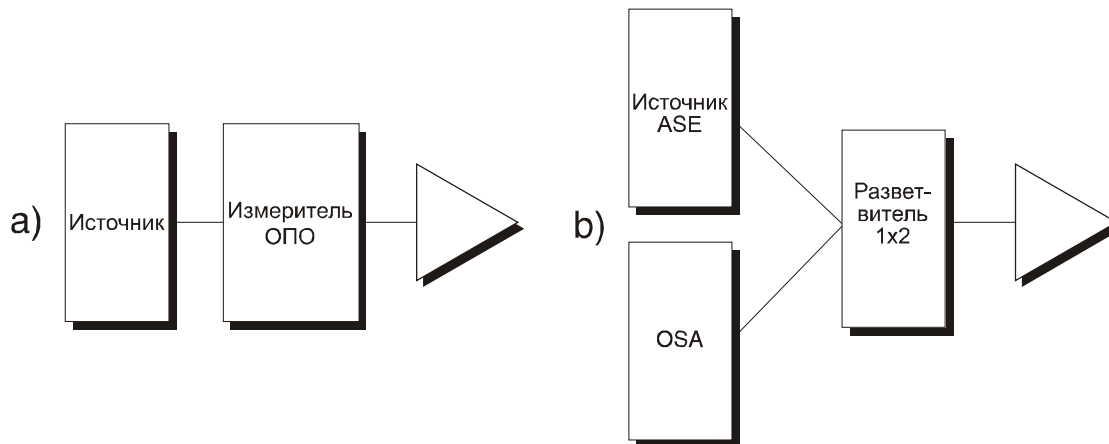


Рис. 4.23 Анализатор OSA измеряет спектральное перераспределение усиления EDFA в зависимости от степени ослабления входных сигналов

Схема, изображенная на рис. 4.24, предназначена исследования влияния обратного отражения на работу EDFA при разных значениях мощности отраженного сигнала и в зависимости от длины волны излучения.

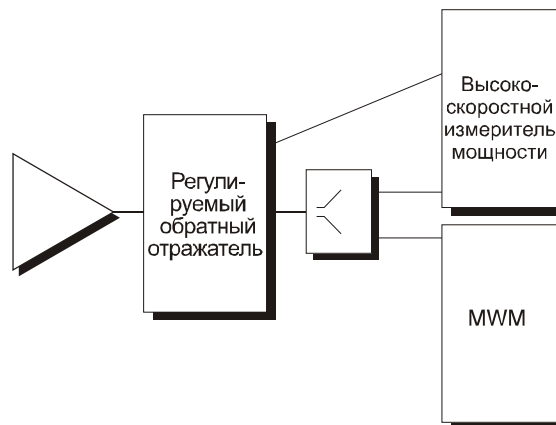


Рис. 4.24 Высокоскоростной измеритель мощности излучения измеряет мощность сигнала, отражаемого обратно в усилитель EDFA

Установив на регулируемом обратном отражателе максимальный уровень, близкий к реальному (коэффициент отражения на границе стекло-воздух составляет 4% или – 13.9 дБ), можно наблюдать за разбросом мощности и волновых характеристик тестируемого компонента (EDFA) и, таким образом, определять доверительный интервал его изоляции. Отношение сигнал/шум для оптического сигнала типового волнового измерителя позволяет обнаружить вторичные пики или сдвиги длин волн на величину порядка 1 пм.

Шум-фактор EDFA влияет на ряд характеристик, определяющих стоимость сети: уровень входной мощности и допустимое расстояние между повторителями. Точное изме-

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Измерение шум-фактора осложняется тем обстоятельством, что основной вклад в шум, даваемый усиленным спонтанным излучением (ASE), изменяется с уровнем сигнала. Простые методы измерения шум-фактора достаточные для большинства электронных устройств, а именно, измерение выходного сигнала в отсутствие входного, применить невозможно. Существует четыре основных метода преодолеть эту трудность – три из них являются оптическими и один электрический.

К оптическим методам относятся: интерполяция, подавление поляризации и метод временного затухания (Time-domain Extinction).

Измерение по методу интерполяции выполняют в широком спектральном диапазоне. Суть метода заключается в измерении сигнала на выходе усилителя при поданном на него сигнале. Уровень излучения ASE внутри полосы пропускания сигнала получают интерполяцией ближайших значений ASE вне полосы, рис. 4.25.

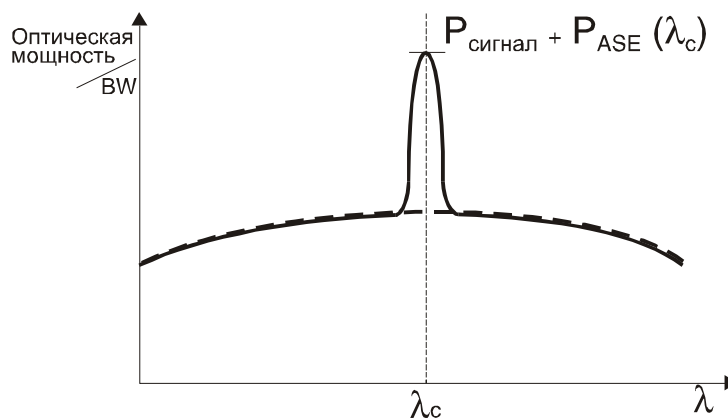


Рис. 4.25 Метод интерполяции для определения шум-фактора EDFA

Если используемый в измерениях источник обладает заметным шумом ASE на длине волны сигнала, то этот шум будет усилен и неотличим от шума ASE усилителя, увеличивая наблюдаемый шум-фактор. Этот эффект вызывает некоторые трудности при относительно высоком уровне входной мощности, что характерно для усилителя мощности, особенно, если усилитель не работает в режиме глубокого насыщения.

Мощность ASE источника, определяемую из других измерений, можно исключить:

$$P_{amp ASE}(\lambda_s) = P_{tot ASE} - G \cdot P_{SSE}$$

где $P_{amp ASE}$ – уровень мощности собственного излучения ASE усилителя на длине волны сигнала λ_s , $P_{tot ASE}$ – полный (измеренный) уровень ASE, G – коэффициент усиления EDFA и P_{SSE} – мощность ASE источника.

Этот метод измерений простой, быстрый и недорогой, но чувствительный к спонтанному излучению используемого источника.

Чтобы устранить влияние спонтанного излучения источника SSE (Source Spontaneous Emission), используют чуть более сложный оптический метод измерения – метод подавления поляризации. В основе метода используется тот факт, что сигнал лазера поля-

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

ризован, а излучение ASE EDFA неполяризовано, так как по своей природе является шумом. Предполагается также, что SSE поляризовано, причем в том же направлении, что и полезный усиливается сигнал источника. Поляризатор используется для удаления сигнала источника; оставшийся сигнал соответствует половине мощности спонтанного излучения (ASE) во всей полосе, рис. 4.26.

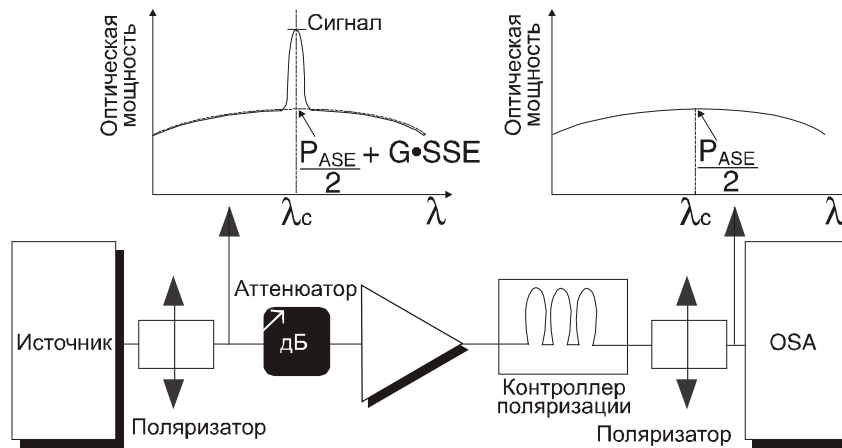


Рис. 4.26 Метод подавления поляризации для определения шум-фактора EDFA

Метод подавления поляризации в основном не чувствителен к стимулированному спонтанному излучению источника SSE и особенно полезен для детального исследования ASE. Однако, метод трудно автоматизировать, и на него может влиять PMD.

Третий оптический метод основан на том факте, что процессы, управляющие изменением числа возбужденных ионов, излучающих на частоте несущего сигнала в EDFA, относительно медленные. Поэтому после исчезновения сигнала спад соответствующего ему излучения ASE длится еще в течение примерно миллисекунды. Таким образом, наблюдая за выходной мощностью канала сразу вслед за прекращением входного сигнала, можно обнаружить ASE в полосе пропускания канала, рис. 4.27.

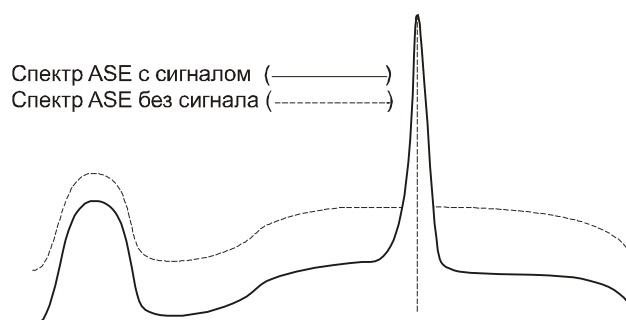


Рис. 4.27 Метод временного затухания для определения шум-фактора EDFA

Данное измерение необходимо проводить очень быстро (~ 10 мс), поэтому требования к точной синхронизации высоки. Несмотря на сложность и затраты, данный метод очень полезен для подробных исследований других характеристик усилителя, например, наклона АЧХ.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Применимость метода временного затухания измерения шума ограничено только усилителями EDFA; спад усиления полупроводниковых оптических усилителей после отключения входного сигнала слишком быстротечен для данного метода.

Электрический метод измерения шума, известный как вычитание относительных интенсивностей шума RIN (Relative Intensity Noise), основан на измерении разброса интенсивности несущей оптического сигнала в некотором частотном диапазоне, рис. 4.28.

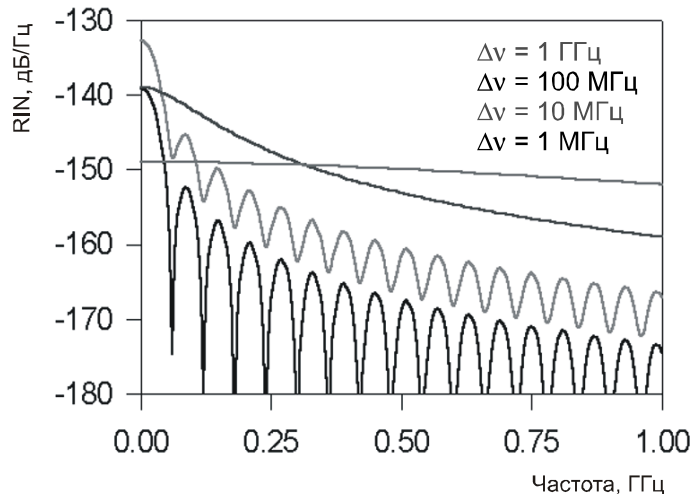


Рис. 4.28 Измерение относительной интенсивности шума (RIN)

В измерении RIN наблюдают за высокочастотными изменениями интенсивности номинально постоянной оптической несущей по изменениям в детектируемом электрическом сигнале. Источник с ограниченным уровнем дробовых шумов подает сигнал на тестируемый компонент, а на его выходе размещают калиброванный, быстрый, малошумящий детектор с ВЧ-усилителем, который и подает сигнал на анализатор электрического спектра ESA (Electrical Spectrum Analyzer), как показано на рис. 4.29.

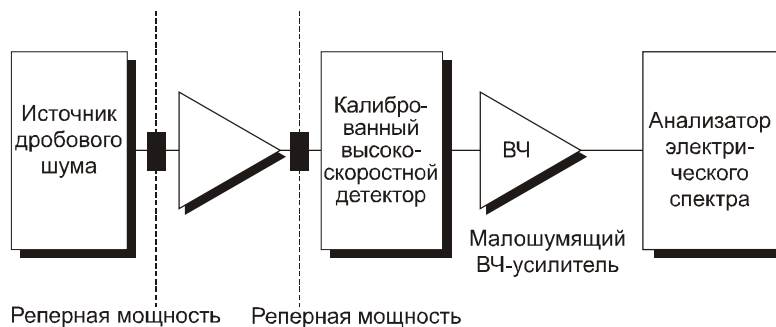


Рис. 4.29 Метод вычитания RIN для определения шум-фактора EDFA

Шум-фактор тестируемого компонента, на месте которого может быть оптический усилитель или целиком линия связи от точки до точки, может быть определен как расстояние до нижнего уровня частотной характеристики RIN, рис. 4.30.

Метод RIN хорошо подходит для обнаружения эффекта многолучевой интерференции MPI (Multipath Interference), обусловленной отражениями на дефектах и смещениях в тестируемом компоненте. Следует отметить, этот эффект не обнаружим при использовании других рассмотренных выше методов. Метод RIN является дорогостоящим, так

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

как требует использования малошумящей аппаратуры и проведения всеобъемлющих калибровок.

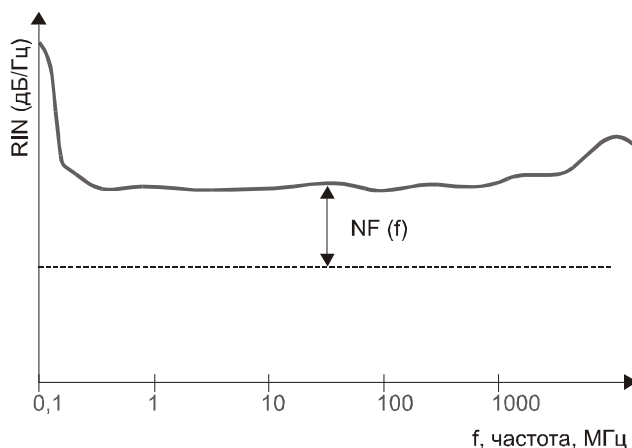


Рис. 4.30 Измерение типичного RIN для усилителя EDFA

Поляризационные эффекты

Анализатор PMD, использующий интерферометрические методы измерений, может измерить собственную поляризационную задержку пассивного модуля EDFA, если в усилителе не используются узкополосные фильтры. В измерении используют поляризованный LED источник излучающий вне сильной полосы поглощения эрбия 1531 нм, рис. 4.31. Такие интерферометрические методы также выявляют шумовые эффекты многолучевой интерференции MPI, возникающие из-за паразитных эталонов Фабри-Перо (несовершенство компонентов или дефекты сращивания волокон).

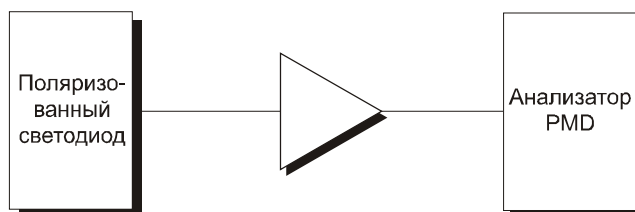


Рис. 4.31 Анализатор PMD, использующий интерферометрический метод, в составе установки для измерения PMD

Влияние сильного шума MPI можно обнаружить с помощью простой комбинации высокоскоростного фотодетектора и осциллографа. Синусоидальный сигнал (с гармониками) на фоновом шуме указывает на присутствие MPI.

Результаты можно улучшить, заменив осциллограф на анализатор электрического спектра, но и в этом случае, для получения достоверных количественных данных требуется тщательная калибровка всей системы в широком ВЧ-диапазоне.

Хотя при обычных условиях эксплуатации EDFA шумы MPI заметно не проявляются, они могут стать существенными, если на выход усилителя попадут отраженные сигналы высокой мощности. Для проверки этой возможности используют устройство с регулируемым обратным отражением. Хорошо изолированный усилитель должен сохранить свою стабильность даже при полном (0 дБ) обратном отражении.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Зависимость усиления от поляризации PDG (Polarization Dependent Gain) и от длины волны измеряют на установке для тестирования потерь PDL с подходящим источником (перестраиваемый лазер или набор источников с фиксированной длиной волны излучения) и преобразователем поляризации, рис. 4.32. Для приведения мощности к типовому уровню в действующей сети потребуется аттенуатор.



Рис. 4.32 Измерение спектральной зависимости усиления EDFA от поляризации

Двустороннее тестирование

Практика двустороннего использования EDFA растет: сигналы одновременно усиливаются в обоих направлениях канала связи. Все описанные ранее тесты можно выполнять в обоих направлениях, причем в быстрой последовательности, если использовать переключатель, как показано на рисунке 4.33.

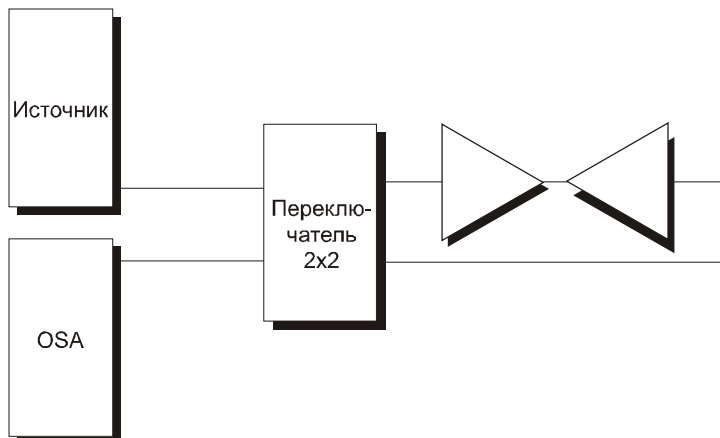


Рис. 4.33 Переключатель 2x2 делает возможным двустороннее тестирование

4.4.6 Брэгговские решетки

Мультиплексоры ввода/вывода, фильтры и другие устройства, содержащие брэгговские решетки, применяются для избирательного выделения определенных длин волн, поэтому их спектральные свойства должны быть хорошо специфицированы. Для исследования мультиплексоров обычно используют схему тестирования, изображенную на рис. 4.34. В ней задействован широкополосный источник ASE и волновой измеритель. Характерные потери на канал составляют порядка 7-8 дБ. Измеренные вносимые потери будут вдвое больше однопроходных вносимых потерь.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

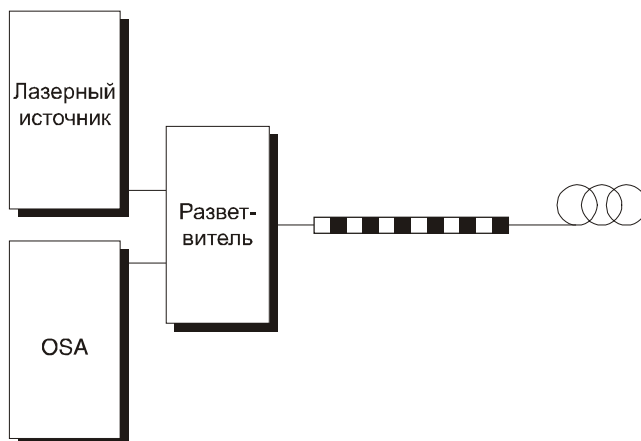


Рис. 4.34 Типовая схема тестирования для измерения отражательной способности брэгговской решетки

4.4.7 Изоляторы

Чтобы не пропускать в обратном направлении отраженный сигнал, или другие нежелательные сигналы, например шум ASE, в оптической линии связи повсеместно необходимы оптические изоляторы. Любое из упомянутых явлений может нарушить целостность сигнала. Вносимые потери для изоляторов и, особенно, потери на отражение необходимо определить во всем диапазоне рабочих длин волн. Эти измерения можно выполнить, используя перестраиваемый лазер и измеритель мощности излучения, либо широкополосный источник ASE и анализатор OSA.

Потери PDL могут существенно повлиять на эффективность изолятора, но так как они постоянны в области 1550 нм (зона DWDM), то обычно ограничиваются единственным измерением, рис. 4.35.

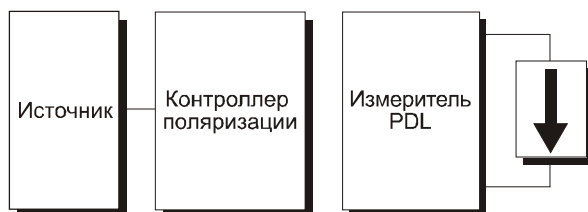


Рис. 4.35 Схема для измерения потерь PDL изолятора

Изоляторам также свойственны и другие явления, обладающие, как правило, спектральной зависимостью. Из-за того, что в обычных изоляторах происходит разделение, а затем рекомбинация внутренних оптических путей, то в них возникает задержка PMD. К тому же механическая конструкция изоляторов чувствительна к мелким дефектам, приводящим к возникновению паразитных эталонов Фабри-Перо и многолучевой интерференции в канале связи. Анализаторы PMD способны исследовать оба явления и определить значения критериев проход/сбой, рис. 4.36.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

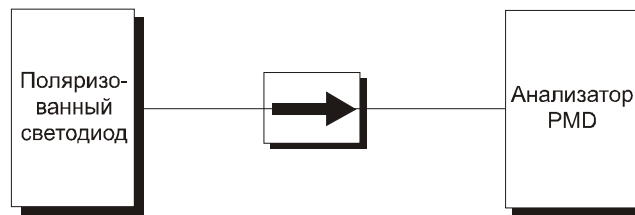


Рис. 4.36 Измерение задержки PMD изолятора

Многие характеристики изоляторов с волновой зависимостью можно измерить на одной тестовой установке, если использовать двухпозиционный переключатель, рис. 4.37.

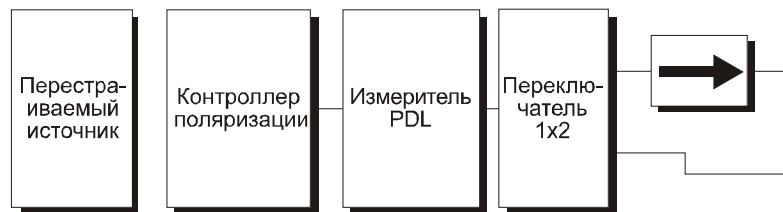


Рис. 4.37 Установка для измерения спектральной зависимости потерь PDL

4.4.8 Волокно

Хроматическая дисперсия

Одним из наиболее фундаментальных явлений, влияющих на пропускную способность волокна в канале связи, по праву считается хроматическая дисперсия (ХД). Хотя ХД можно измерить множеством различных способов, для ее определения в зоне 1550 нм лучше всего подходит схема измерения, показанная на рис. 4.38.

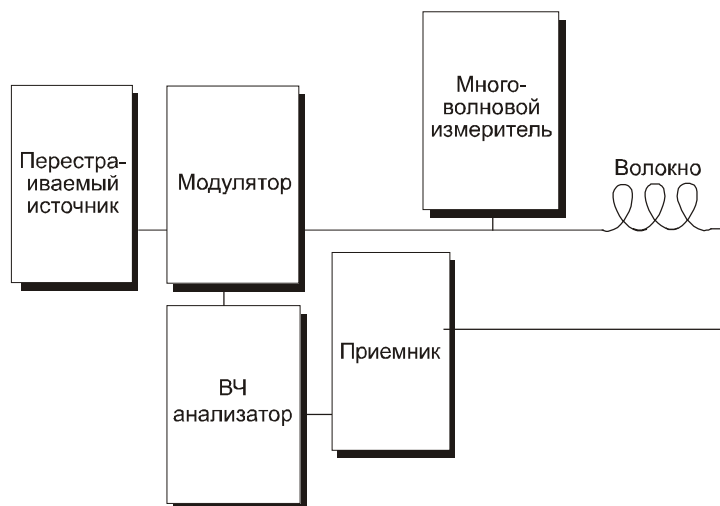


Рис. 4.38 Типовая схема измерения хроматической дисперсии

Сигнал с перестраиваемого лазера модулируется внешним модулятором с частотой примерно равной частоте используемой при передаче реальных сигналов. Длину волны источника контролируют, отводя малую долю сигнала в волновой измеритель. Сигнал передается по тестируемому волокну, и на приемнике детектируется ВЧ-модулированный сигнал. Сравнивая фазы демодулированного и исходного сигналов,

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

определяют групповую задержку для сигнала на данной длине волны. Перестраивая источник в рабочем диапазоне длин волн с некоторым шагом, можно получить полную дисперсионную характеристику.

Поляризационная модовая дисперсия

Измерять PMD в режиме реального времени непрактично, так как измерения связаны с очень высокими частотами. Существует четыре основных метода косвенных измерений. Два из них используют сканирование диапазона длин волн: метод преобразования Фурье и метод подсчета экстремальных значений. К другим относятся интерферометрический метод, а также два тесно связанных поляриметрических метода: анализ матрицы Джонса (JME) и анализ сферы Пуанкаре (PSA).

Общепринятыми являются два способа выражения результатов измерения PMD: среднеквадратичное отклонение времени пролета и среднее ожидаемое время DGD. Первое представление используют в интерферометрическом методе и методе преобразования Фурье со сканированием длин волн, а второе представление в методе подсчета экстремальных значений и методе JME.

Методы сканирование длин волн

Обе процедуры со сканированием длин волн – подсчет экстремальных значений и преобразование Фурье – можно выполнять по схемам, изображенным на рис. 4.39.

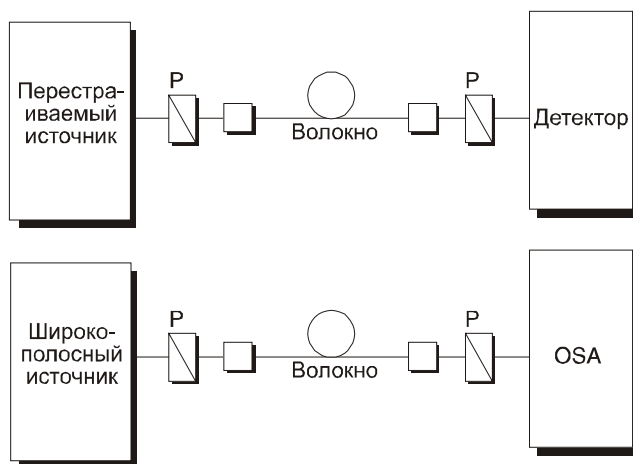


Рис. 4.39 Схема измерения со сканированием длин волн

Оба поляризатора – на выходе источника и перед анализатором – устанавливаются с одинаковым состоянием поляризации. Затем снимают зависимость передаточного коэффициента от длины волны. В отсутствие двулучепреломления в волокне поляризованный свет источника всегда прибывал бы на второй поляризатор под одним и тем же углом, поэтому измеряемая мощность была бы постоянной. Но если волокно обладает двулучепреломлением, то свет на выходе второго поляризатора будет периодически меняться с изменением длины волны – эти колебания фиксируются детектором, рис. 4.40.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

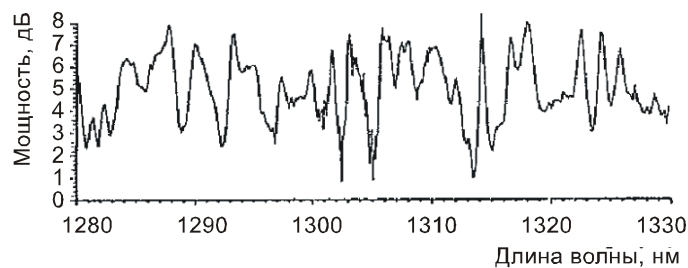


Рис. 4.40 Зависимость амплитуды сигнала источника от длины волны

Методы отличаются способом обработки полученной информации. В первом – производят подсчет экстремальных значений в заданном волновом диапазоне и с помощью математических формул получают значение PMD. Во второй метод выполняют преобразование Фурье сканированной последовательности интенсивностей и извлекают параметр PMD (среднеквадратичное отклонение аппроксимирующей гауссовой кривой разложения Фурье).

Этим методам присущ ряд ограничений:

- Измерение больших значений PMD требует очень малых приращений по длине волны и высокого разрешения.
- Увеличение волнового разрешения уменьшает динамический диапазон.
- Чтобы получить надежные данные, на выходе необходимо наблюдать по меньшей мере одно полное колебание, поэтому диапазон изменения длин волн должен быть достаточно велик.
- Подсчет числа колебаний может быть чувствителен к шуму и часто зависит от способа определения.
- Степень когерентности источника должна быть намного больше, чем групповая задержка поляризационных мод.
- Измерение в обоих случаях чувствительно к вибрациям волокна и занимает много времени.
- Оба метода чувствительны к состоянию начальной поляризации.

Интерферометрические методы

PMD можно измерять, используя широкополосный поляризованный источник и анализируя прошедшее через тестируемое волокно излучение интерферометром Майкельсона, рис. 4.41.

Источник выбирают таким образом, чтобы центральная длина волны подходила для измерения (для современных DWDM систем это 1550 нм), а время когерентности было намного меньше задержки PMD тестируемого волокна. В интерферометрическом методе значение PMD получают непосредственно на графике автокорреляционной функции сигнала источника с этим же сигналом, задержанным переменным плечом интерферометра. Предполагается, что спектр источника имеет приблизительно гауссову форму без заметной ряби. Выполнение этого условия следует проверять при выборе источника с помощью анализатора OSA.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

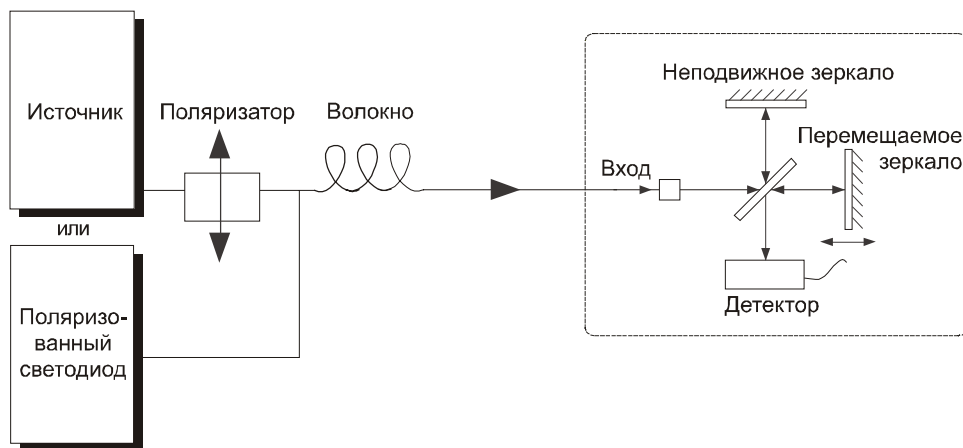


Рис. 4.41 Измерение PMD с использованием поляризованного сигнала и интерферометра

Необходимое условие – время когерентности источника много меньше задержки PMD – проверяют по интерферограмме. По обе стороны от главного пика автокорреляции должны присутствовать, по крайней мере, два максимума и оба используются при подборе параметров гауссовых кривых.

Поляризация источника обеспечивается во всем спектральном диапазоне отдельным поляризатором, который можно включить в модуль источника. Приемник должен иметь соответствующие значения отношения сигнал/шум и динамического диапазона, чтобы охватить все возможные условия измерения, в том числе и ручную регулировку. Тестируемое волокно подготавливают соответствующим образом, закрепляя его в недеформированном состоянии. Так как измерение проводится довольно быстро, то температурный контроль обычно не нужен.

Измерению тестируемого волокна обычно предшествует измерение источника. Поляризованный источник напрямую подсоединяют к интерферометру и убеждаются в наличии единственного, гладкого, приближенно симметричного автокорреляционного пика. После этого можно выполнить “калибровочное” измерение на эмуляторе PMD – фиксированном, либо переменном. Эмулятор тщательно подготавливают, чтобы обеспечить фиксированное значение PMD или требуемый набор значений.

После предварительной проверки и “калибровки” приступают к измерению самого волокна, обычно при нескольких различных входных состояниях поляризации (некоторые из них будут сильнее привязаны к главным осям тестируемого волокна). Если требуется проследить температурную зависимость, то чтобы обнаружить значимые изменения, рекомендуется изменять температуру с шагом не менее 5°C.

PMD можно вычислить из получившейся интерферограммы двумя способами. Первый способ зависит от степени связывания мод в тестируемом волокне. Эта связь бывает пренебрежимо мала в коротких или в специально изготовленных волокнах. Если это так, то на интерферограмме наблюдают сильный центральный пик (автокорреляция источника) и два соседних, симметрично расположенных пика-спутника, удаленных от центрального на величину групповой задержки в волокне, рис. 4.42. Таким образом, значение PMD определяется этим смещением или половиной полного расстояния между пиками-спутниками. Найденную величину обычно приводят к единичной длине волокна делением на длину тестируемого образца. Полученный коэффициент PMD

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

измеряется в единицах пс/м или пс/км. Линейная зависимость PMD от длины волокна в случае слабой связи мод объясняется тем, что в волокне фактически распространяются только две моды: быстрая и медленная, обменом энергией между которыми можно пренебречь.

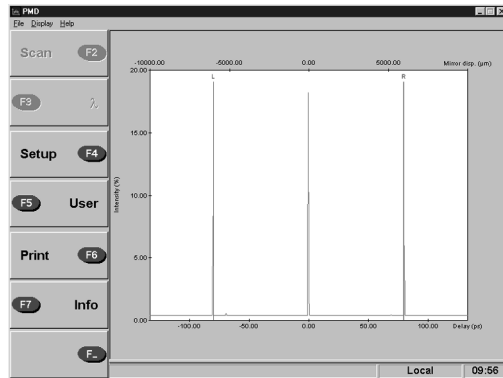


Рис. 4.42 Показания анализатора PMD для случая слабой связи мод

Значительное и случайное связывание мод в тестируемом волокне размывает соседние пики, и для определения PMD потребуется дополнительный анализ. Второй момент (среднеквадратичное отклонение) автокорреляционной функции выражается через наблюдаемые величины следующим образом (рис. 4.43):

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{3/4} \cdot \sigma$$

где $\langle \Delta\tau \rangle$ – средняя задержка PMD и среднеквадратичное отклонение автокорреляционной функции, а σ – стандартное отклонение гауссовой кривой, аппроксимирующей пик.

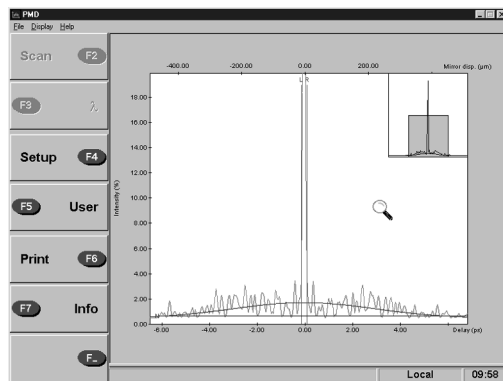


Рис. 4.43 Показания анализатора PMD для случая сильной связи мод, аппроксимируемое Гауссовой кривой

В случае сильного связывания мод из-за случайного характера их связывания, нормализованное значение или коэффициент дисперсии будет $\langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$ и измеряется в пс/м^{1/2} или пс/км^{1/2}.

Точность анализа измерения в обоих случаях зависит от количества используемых точек, а значит от величины и точности возможного перемещения плеча интерферометра. Точность во втором методе анализа также зависит от возможности построения подходящей аппроксимации при наличии шума. Опыт многократных измерений пока-

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

зывает, что при умеренном отношении выходного сигнала/шум и при измеренной PMD 1 пс и больше, достижима точность от 5 до 10%. Но для PMD 0.1 пс и меньше эта точность может ухудшиться до 20-25%.

Полная амплитуда перемещения подвижного плеча интерферометра определяет максимально возможную измеряемую задержку PMD. На практике возможное перемещение плеча должно соответствовать величине ожидаемого значения PMD с трехкратным запасом.

Минимальная измеряемая задержка PMD определяется временем когерентности источника (его спектральной шириной) и числом пиков, наблюдаемых на интерферограмме.

PMD второго порядка (PMD_2), которая описывает изменение PMD с длиной волны, тесно связана с явлением первого порядка и оценивается по следующей формуле:

$$PMD_2 = 2\pi c \cdot (PMD_1)^2 / \lambda^2 \sqrt{3}$$

где PMD_1 – коэффициент PMD первого порядка, c – скорость света и λ – длина волны излучения.

Например, коэффициенту PMD первого порядка равному 0,5 пс/км^{1/2} будет сопутствовать эффект второго порядка с величиной около 0,15 пс/(нм·км).

Требования к интерферометрическим методам

- Измерение больших значений PMD требует больших смещений подвижного зеркала интерферометра.
- Время когерентности источника должно быть намного меньше измеряемой задержки.

Характеристики интерферометрических методов

- Измерение выполняется быстро и нечувствительно к вибрациям волокна.
- Метод пригоден для полевых условий.
- Широкий динамический диапазон.
- Чувствительность к состоянию поляризации на входе.

Поляриметрические методы

Изложенные до сих пор методы измерения PMD достаточны для многих практических приложений, особенно для характеристики волокон с сильной, случайной связью мод и при умеренных задержках PMD. Чтобы охватить весь диапазон PMD в волокнах с произвольной степенью связи, потребуется более детальное исследование поляриметрических параметров передающей среды, лежащих в основе явления PMD. В настоящее время известны два таких метода: метод анализа матрицы Джонса JME и метод анализа сферы Пуанкаре PSA. Ключевые моменты обоих методов состоят в вводе определенного набора поляризованных сигналов в волокно или в другой тестируемый компонент системы WDM и в полном описании состояний поляризации сигналов на выходе. Такая информация позволяет получить спектральную зависимость соответствующих (нормализованных) векторов Стокса.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

В методе JME все входные сигналы линейно поляризованы, в то время как в первоначальном варианте метода PSA один из сигналов должен иметь круговую поляризацию. Однако в ревизованном в последнее время специалистами EXFO варианте PSA требуются те же самые три линейно поляризованных состояния на входе, что и в методе JME. В настоящее время осознан тот факт, что эти два метода эквивалентны в своей основе, и происходит процесс их слияния в один метод, который можно будет рекомендовать в качестве международного стандарта. Действительно, оба метода определяют волновую зависимость задержки DGD по одному набору исходных данных (выходные векторы Стокса).

Метод JME обычно применяют на установке, укомплектованной перестраиваемым лазерным источником, в то время как в методе PSA (в модификации EXFO) используют комбинацию широкополосного источника и интерферометра. В состав измерительной установки также входят устройство для подстройки линейного состояния поляризации, тестируемое волокно/компонент и четырехпортовый поляриметр.

Измерительная установка записывает функциональную зависимость параметров Стокса от длины волны. По параметрам Стокса можно вычислить состояние поляризации на выходе (т.е. выходные векторы Стокса) и степень поляризации как функцию длины волны.

В методе матриц Джонса измеренные вектора Стокса вначале преобразуются в вектора Джонса. Затем вычисляют зависящие от оптической частоты коэффициенты матрицы Джонса, т.е. передаточной матрицы устройства, которая описывает преобразование входных состояний поляризации в выходные. Задержки DGD окончательно вычисляют из свойств (собственные значения) матрицы, составленной из двух матриц Джонса для соседних длин волн, равноудаленных от текущей. В методе сферы Пуанкаре задержки DGD получают в виде линейной комбинации конечных разностей, составленных по двум наборам выходных векторов Стокса на соседних длинах волн. Формально эквивалентность этих двух методов прослеживается через выражение матрицы поляризационной дисперсии (в представлении векторов Джонса) с помощью вектора поляризационной дисперсии (в представлении Стокса) В отсутствие шумов оба метода дают одинаковые результаты, рис. 4.44. При наличии шумов результаты не являются идентичными, но каждый из методов обеспечивает одинаковую точность.

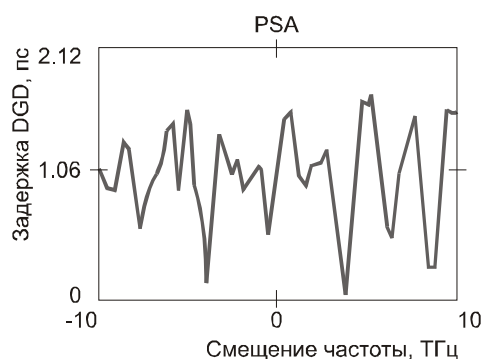


Рис. 4.44 Зависимость задержки DGD от частоты, определяемая методом JME и PSA (одинаковая)

Окончательно задержка PMD одного измерения определяется как среднее по всем дифференциальным задержкам DGD в интересующем волновом диапазоне.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Основные ограничения поляриметрических методов.

- При измерении больших задержек PMD и/или при измерении узкополосными устройствами и/или сильной зависимости DGD от длины волны требуется очень малый шаг приращения длины волны (~ 0.01 нм) или большое перемещение плеча интерферометра.
- Увеличение спектрального разрешения ведет к уменьшению динамического диапазона.
- Чтобы набрать хорошую статистику для длинных волокон с сильной связью мод потребуются широкий волновой диапазон и маленький шаг приращения длины волны.

Дополнительные ограничения при использовании перестраиваемых лазерных источников.

- Когерентность источника должна быть намного больше измеряемой задержки, чтобы избежать деполяризации.
- Измерение может занимать много времени (несколько минут) в зависимости от спектрального диапазона и шага приращения.
- При измерении ТК с малыми PMD или при малом шаге приращения измерение чувствительно к перемещениям (вибрациям волокна) и тепловому воздействию.

Дополнительные ограничения при использовании широкополосных источников и интерферометра.

- Остаточные PMD и потери PDL самого интерферометра.
- Когерентность источника должно быть намного меньше измеряемой задержки, чтобы избежать нежелательных эффектов в интерферометре вследствие когерентности излучения.

Традиционно более часто используют метод JME, так как он не осложнен использованием входных сигналов с круговой поляризацией и менее требователен к шагу приращения. В новом подходе метода анализа сфер Пуанкаре эти ограничения сняты. Действительно, в новом варианте метода PSA используются широкополосный источник света и интерферометр в приемнике. Это устраняет главные ограничения прежнего подхода с использованием перестраиваемого лазерного источника. Так как распределения DGD получаются методом PSA намного быстрее, то полученные результаты менее чувствительны к изменению начальных и окружающих условий. Новый подход открывает дорогу как для высокоточных измерений PMD при контроле за процессом изготовления, так и для измерений в полевых условиях.

4.5 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ

Чтобы ускорить процесс тестирования компонентов и воспользоваться преимуществами современных средств автоматизации, компании, занимающиеся оптическими измерениями, стараются полностью задействовать потенциал измерительных систем. Системы тестирования пассивных компонентов предлагают новаторский подход в составлении характеристик DWDM-компонентов. Система выполняет сканирование

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

всей спектральной полосы тестируемого компонента (ТК) малошумящим, перестраиваемым лазерным источником и одновременно измеряет мощность по нескольким каналам. Это обеспечивает быстрое время тестирования, практически независимое от числа портов ТК. Так как перестраиваемый лазерный источник обладает низким уровнем шумов, то легко достигается динамический диапазон 60 дБ. Точность перестройки источника во всем диапазоне сканирования обеспечивается модулем с эталонной длиной волны излучения.

В проектируемые измерительные системы закладывается возможность тестирования практически любой характеристики: вносимых потерь, равномерности, пульсаций, перекрестных помех, изоляции, центральной длины волны, разнесения каналов, пиковой мощности, ширины полосы пропускания и потерь PDL.

Отдельные системы предлагают измерение PDL матричным методом Мюллера и позволяют проследить спектральную зависимость этих потерь во всем диапазоне. Измерения затухания и PDL выполняется без каких либо дополнительных манипуляций с волокном.

Модульное построение системы и гибкость программного обеспечения (ПО) позволяют легко увеличивать количество каналов. Например, одноканальную систему для измерения фильтров или решеток можно расширить до 32, 64 и большего числа каналов простым добавлением сменных модулей.

В большинстве систем ПО управляет функциями инструментов на всех этапах измерений. Для повторяющихся тестовых измерений часто используется пошаговая организация процесса измерений и это обеспечивает точные и воспроизводимые результаты. Самые разнообразные возможности, как, например, автоматическая проверка критерия проход/сбой, наличие настраиваемых критериев отбора (фильтры-маски), база данных номеров компонентов значительно облегчают составление характеристик DWDM-компонентов.

В состав измерительной системы могут входить следующие компоненты:

- Платформа. Системный контроллер, используемый для управления процессом измерения, а также интерпретации и хранения данных. Поставляемый контроллер позволяет подсоединить измерительную систему к локальной сети передачи данных.
- Источник. Перестраиваемый лазерный источник используют в качестве источника излучения для получения спектров поглощения с высоким разрешением. Для широкополосных приложений (это зависит от ТК и исследуемых характеристик) используют источник другого типа – ASE.
- Модуль с опорной длиной волны WRM (Wavelength Reference Module). Главное предназначение модуля состоит в обеспечении высокой точности измерения длины волны. К вспомогательным функциям модуля относятся: обеспечение синхронизации всех измерений мощности, предоставление непрерывного, динамического, опорного значения мощности и измерение ORL.
- Детектор. Чаще всего это измеритель мощности излучения, синхронизированный с модулем WRM. Он измеряет мощность прошедшего сигнала, которая сравнивается с мощностью опорного сигнала WRM. Сопоставление этих значений позво-

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

ляет вычислить спектральное затухание ТК. Для мониторинга длин волн и детального анализа спектра используют анализатор OSA.

- Регулятор состояния поляризации (PSA). Регулятор PSA используется для получения четырех известных состояний поляризации (SOP). Для каждого состояния SOP выполняют измерение методом сканирования и, зная величины затухания для каждого состояния, вычисляют спектральную зависимость потерь PDL матричным методом Мюллера. Время, затрачиваемое на измерение потерь PDL, равно времени выполнения четырех циклов сканирования.
- Деполяризатор. Этот компонент используется при измерении потерь PDL для приведения сигнала перестраиваемого лазера в определенное состояние. Его также используют в измерениях затухания, для которых требуется обеспечить неполяризованный свет.

Системное ПО хранит данные для устройств каждого типа в отдельных базах данных. Обычно используют доступные для приобретения коммерческие базы данных. Эти базы данных можно формировать на локальных измерительных установках, либо на центральной сервере, куда информация поступает по локальной сети. Данные измерений можно экспортировать в формат “.txt” с разделителями, совместимый со многими программами хранения и анализа. Автоматизированная измерительная система использует необходимое ПО, позволяющее производителям систем и компонентов повысить надежность, воспроизведение и скорость выполнения их процедур тестирования независимо от того, выполняются ли они в лаборатории, центральном офисе или на линии.

4.6 КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Все ранее рассмотренные компоненты в конце концов используются в полевых условиях, где они подвергаются воздействию самых различных факторов окружающей среды, таких как: температура, влажность, электрические и магнитные поля и многое другое. Процедуры для выявления зависимости поведения электронных компонентов и модулей от внешних условий хорошо известны. Для характеристики каждого компонента необходимо выполнить все надлежащие измерения в ожидаемых условиях эксплуатации.

Волоконно-оптические компоненты, как и остальные оптические средства коммуникации, благодаря своей конструкции надежно защищены от многих возмущающих факторов окружающей среды, в частности электрических и магнитных полей. Герметичный монтаж защищает их проникновения влаги.

Температура является главным возмущающим фактором окружающей среды. Многие важные оптические характеристики волоконно-оптических компонентов зависят от физических размеров: шаг дифракционной решетки или брэгговского эталона, длины отдельных волокон в решетке на основе массива волноводов, толщина слоев тонкопленочных фильтров – все эти размеры меняются пропорционально изменению температуры с коэффициентом линейного расширения используемого материала. Хотя в некоторых случаях в компонентах может быть предусмотрена компенсация температурных изменений (например, не чувствительный к температуре биконический разветвитель), в общем случае должна быть измерена зависимость производительности устройства от температуры. Обычно предпринимают активные меры для компенсации температурного воздействия, либо изготавливают термостабильные защитные корпуса.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Многие характеристики усилителей EDFA, в том числе и изменяющиеся со временем, чувствительны к температуре. Необходимо исследовать температурную зависимость спектра усиления в ожидаемом температурном диапазоне, как наиболее важной характеристики. Для остальных же характеристик, или для одной наиболее представительной, исследуют температурную зависимость на используемых длинах волн. Обычно эти исследования проводят для малых сигналов и либо в режиме насыщения, либо в точке трехдецибельного спада, в зависимости от предназначения усилителя (бустер, линейный усилитель или предусилитель).

Чтобы одновременно измерять параметры всех каналов, используют набор фиксированных источников, длины волн которых соответствуют длинам волн каждого волнового канала, либо широкополосный источник ASE, покрывающий всю полосу передачи системы. Для проведения последовательных измерений можно использовать перестраиваемый лазер. Для спектральных измерений также подбирают подходящий приемник: анализатор OSA, многоволновой или обычный волновой измеритель.

Тестирование EDFA обычно выполняют в термокамере с регулируемой температурой и влажностью.

Важнейшие параметры практически всех многочисленных компонентов, используемых в системах WDM, могут зависеть от температуры и влажности, поэтому обеспечение работоспособности системы при всех возможных изменениях компонентов выглядит проблематичным. Чтобы обеспечить высокую управляемость измерительной системы на всех этапах тестирования, необходимо выработать методики, позволяющие тестировать в одной измерительной процедуре как можно большее число параметров желательно всех устройств, или набор методик, использующих одну и ту же измерительную установку. Там где это возможно, используют полностью автоматизированные процедуры тестирования и компьютеризованные средства сбора, обработки, отображения и анализа данных.

Современный модульный подход к построению измерительного оборудования упрощает эту задачу. Модули, имеющие общую структуру и командный язык управления, можно соединять многочисленными способами и удовлетворять при этом требованиям большинства измерительных процедур. ПО управления измерительными установками позволяет перепрограммировать процедуры измерений на языках высокого уровня. Двухзначные критерии типа “да/нет” на отдельных этапах тестирования могут обрабатываться автоматически, и поэтому подробные спектральные характеристики можно получать без вмешательства оператора.

4.7 ТЕСТИРОВАНИЕ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

В предыдущих разделах кратко упоминались те сложности, которые отличают тестовые измерения в стационарных условиях лаборатории или серийного производства от измерений в полевых условиях. Некоторые измерения попросту невозможно надежно выполнить где-либо, кроме как в стабильных и контролируемых условиях. Опять же, для многих измерений требовались возможности, до недавнего времени недоступные в приборах, предназначенных для использования в полевых условиях. Стандартные задачи измерения основных параметров каналов связи, независимых от используемых режимов передачи данных, традиционно решаются измерительным оборудованием для полевых условий. Но в последнее время появился целый ряд новых требований к такому оборудованию. Прежде всего это связано с измерением DWDM компонентов и исследованием влияющих на них сложных оптических явлений.

4.7.1 Измеритель оптических потерь

Измеритель оптических потерь Optical Loss Test Set (OLTS), используемый в DWDM системах, необходимо калибровать с прецизионной точностью на длинах волн каналов в диапазоне от 1525 до 1565 нм. Это, в свою очередь, означает возможность точного измерения мощности отдельных каналов на выходе демультиплексоров.

Эти измерители так же используются на длинах волн оптических контрольных каналов OSC (Optical Supervisory Channel): 1480 нм, 1510 нм и 1625 нм, в зависимости от предназначения системы. Для проверки бюджета потерь после прокладки волокна потребуются специализированные DFB лазерные источники. Особое внимание требуется к самой большой длине волны контрольного канала 1625 нм, так как она лежит за пределами диапазона, в котором производители волокна или кабеля обычно гарантируют эффективную работу своей продукции. В настоящее время на рынке предлагаются измерители оптических потерь, включающие эту длину волны.

4.7.2 Рефлектометр

Современные рефлектометры (OTDR) часто включают возможности измерений в четвертом волновом диапазоне в районе 1625 нм¹. Помимо тестирования и обнаружения неисправностей на оптическом канале 1625 нм, использование этой длины волны обладает рядом других важных преимуществ. Например, активные волокна во многих случаях можно тестировать на длине волны 1625 нм, в то время как передача по DWDM каналам в спектральном диапазоне EDFA не прекращается. Кроме того, оптические потери из-за изгибов волокна сильнее выражены на длине волны 1625 нм, чем на более коротких рабочих длинах волн DWDM каналов. Тестирование с помощью рефлектометров на длине 1625 нм может выявить критические участки в проложенном волокне, то есть такие участки, в которых эффективность передачи на момент прокладки приемлема, но в будущем может снизиться из-за деградации волокна, рис. 4.45.

¹ Согласно новой, недавно принятой ИТУ классификации спектральных диапазонов в одномодовом волокне 5-й L-диапазон (Long) занимает полосу 1565-1625 нм, а 6-й U-диапазон (Ultra-long) – полосу 1625-1675 нм. (прим. ред.)

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

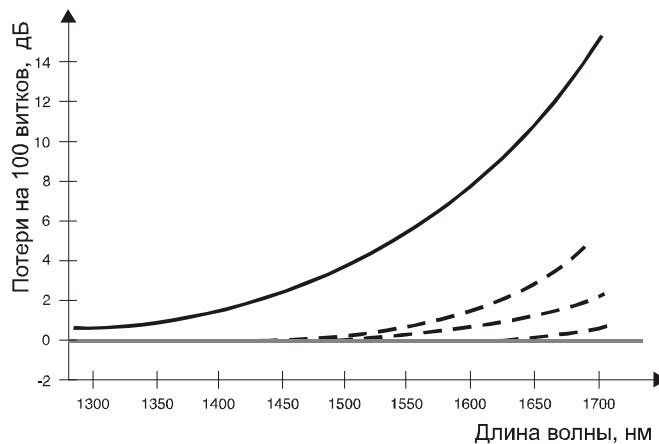


Рис. 4.45 Сравнение потерь на изгиб для волокон различных типов в зависимости от длины волны

4.7.3 Измеритель потерь на отражение

В обычной сети оптические потери на отражение ORL можно определить одиночным измерением на рабочей длине волны с помощью измерителя потерь на отражение. Для систем WDM одного измерения в полевых условиях недостаточно. Возможны два варианта: общее измерение, охватывающее всю используемую полосу пропускания, либо подробное, с предоставлением результатов по каждому волновому каналу. Хотя, ясно, что первое измерение выполняется быстрее и дает достаточно информации для принятия решения по критерию проход/сбой, потери ORL могут значительно меняться от канала к каналу. Изменения потерь с длиной волны могут быть вызваны неисправной брэгговской решеткой, или, что случается чаще, плохими разъемами в выходных портах мультиплексора или демultipлексора. Избыточное обратное отражение может вызвать нестабильность DFB-лазеров, влияющую на эффективную работу системы. Таким образом, потребность в выполнении более сложного измерения волновой зависимости ORL будет возникать довольно часто.

Общее измерение выполняется с широкополосным источником и независимым измерителем мощности. Таким же образом выполняется измерение в оптическом канале связи с одной длиной волны. Измерение дает один результат: полная мощность ORL по всему спектру передачи данных в точке тестирования.

Зависимость ORL от длины волны часто бывает полезно знать для внутреннего анализа и ее важно уметь определять, если более простой, общий тест недостаточен для данного канала связи. В детальном измерении используют мощный широкополосный источник, обычно источник усиленного спонтанного излучения. Высокая мощность необходима для того, чтобы обеспечить достаточную мощность в каждом измеряемом частотном интервале (его ширина может составлять 0,1 нм) и адекватное отношение С/Ш на приемнике при самых низких интересующих значениях ORL. В качестве приемника используют анализатор OSA с достаточным спектральным разрешением и чувствительностью. Для каждого канала получают отдельное значение ORL: обычно, именно эта информация и требуется при выявлении неисправностей в системе, рис. 4.46.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

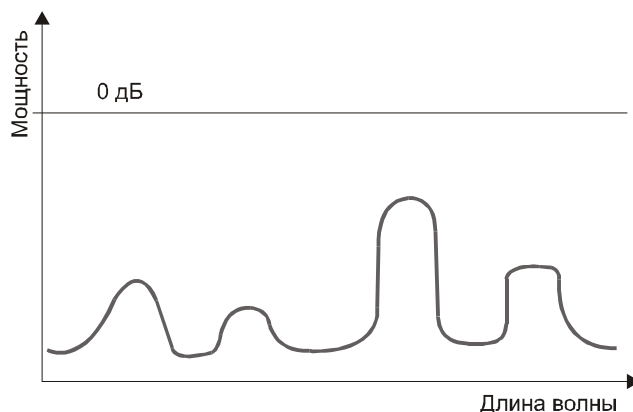


Рис. 4.46 Схематическое представление спектрального измерения потерь на отражение ORL

4.7.4 Установка для измерения PMD

Измерения в полевых условиях указывают на то, что нередко PMD волокон в проложенных кабелях намного выше, чем в отдельном волокне. Волокно, протестированное производителем, с некоторой степенью достоверности соответствует декларируемым параметрам, но это вовсе не гарантирует, что сеть с установленным волокном будет удовлетворять предъявляемым требованиям.

Мгновенное значение PMD для конкретной длины волны может меняться со временем. Однако тесты, выполняемые в полевых условиях интерферометрическим методом показывают, что усредненное по длинам волн значение PMD относительно стабильно. Это наводит на мысль, что вычисляемый в интерферометрическом методе второй момент задержек DGD, через который и выражается среднее значение PMD, является лучшим параметром для характеристики PMD в волокне. Наличие такого стабильного параметра позволяет проводить сравнение различных волокон одного кабеля и использовать критерий проход/сбой, значение которого зависит от скорости передачи в сети и допустимого коэффициента ошибок BER.

Важно измерять PMD в реальных условиях эксплуатации сети. Например, в некоторых методах измерения PMD требуется, чтобы источник и анализатор находились рядом друг с другом, а не на противоположных концах линии связи. Чтобы удовлетворить этому требованию для отдельного канала связи, возникает естественное желание использовать обратный канал связи, приходящий к месту тестирования. Такая постановка измерения представляет две трудности. Во-первых, один из тестов неизбежно выполняется не в нужном направлении. Во-вторых, так как результат по двум отдельным каналам связи объединен в одном измерении, то заключение по критерию проход/сбой для любого из двух каналов может оказаться ошибочным. Поясним вышесказанное на простом численном примере:

ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

При сильной связи мод полная PMD для двухкаскадной линии связи будет определяться соотношением:

$$PMD_{1+2} = (PMD_1^2 + PMD_2^2)^{1/2}$$

где PMD_{1+2} – полная PMD оптического канала связи, а PMD_1 и PMD_2 – отдельно измеренные значения PMD на первом и втором участке канала связи.

Примем, что максимально допустимая задержка PMD для канала связи длиной 40 км составляет 2,5 пс ($0,4 \text{ пс/км}^{1/2}$). Если два 40-километровых канала тестируются вместе, и один обладает задержкой PMD 1,5 пс ($0,24 \text{ пс/км}^{1/2}$), а другой 3 пс ($0,47 \text{ пс/км}^{1/2}$), то наблюдаемый результат для 80 км составит 3,35 пс ($0,37 \text{ пс/км}^{1/2}$). Оба канала будут признаны как “хорошие”, хотя один из них, безусловно, не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Аналогично, если PMD одного канала равна 2 пс ($0,32 \text{ пс/км}^{1/2}$), а другого - 4 пс ($0,63 \text{ пс/км}^{1/2}$), то объединенный результат для 80 км составит 4,47 пс ($0,50 \text{ пс/км}^{1/2}$), свидетельствуя, что оба канала плохие. Теперь мы делаем обратную ошибку, принимая хороший канал за плохой. Вывод из данного примера: следует предпринять все усилия, чтобы каналы связи измерялись в той конфигурации, в какой они используются.

Несомненно, PMD станет одним из важнейших факторов в высокоскоростных магистральных сетях, со скоростью передачи 10 Мбит/с и более. Хотя коэффициент PMD изготовленного кабеля можно измерять еще на заводе, укладка кабеля и другие пусконаладочные операции неизбежно и довольно часто будут приводить к механическим воздействиям на волокно, что, в конечном итоге, изменит значение PMD. Усилители EDFA все чаще используются для увеличения длин кабельных участков, поэтому необходимо учитывать и минимизировать все источники дисперсии в них, чтобы эффект усиления сигнала не был нейтрализован разрушающим воздействием PMD.

Для измерения PMD в полевых условиях наиболее пригоден интерферометрический метод. Это быстрый метод; ему не требуются дополнительные линии связи для измерительной аппаратуры или каналы обратной связи. Методу присущ большой динамический диапазон, позволяющий измерять большие значения PMD на больших расстояниях. Метод также нечувствителен к вибрациям в волокне.

Производство и приемный контроль компонентов системы DWDM потребовали новых методик и средств измерений. Наиболее важные из них были представлены в данной главе. Тем не менее, быстрое развитие технологии, безусловно, приведет к появлению новых измерительных процедур и методик их проведения. Также, несомненно, что некоторые из этих измерений приобретут с развитием технологии еще больший вес (например, измерение потерь PDL). Все эти специализированные методики и оборудование быстро развиваются и, покидая стены лабораторий и производственные испытательные стенды, выходят на широкий простор, где их уже используют в полевых условиях. Следующая глава посвящена ключевым вопросам тестирования и исследования систем, перед тем, как они будут окончательно сданы в эксплуатацию.

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 5

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

Стремительное развитие технологии WDM требует современных методик тестирования. Технология WDM позволяет во много раз увеличить пропускную способность существующих сетей связи и открывает новые возможности в построении полностью оптических сетей. Эта цель может быть достигнута только при правильной работе всех компонентов системы, для чего требуется как тщательное их тестирование в процессе монтажа, так и соответствующий контроль их характеристик в процессе эксплуатации.

В предыдущей главе обсуждались различные компоненты систем WDM. В этой главе рассматривается система WDM как единое целое.

После того, как система полностью смонтирована, необходимо провести измерения оптических и электрических характеристик линии связи и убедиться, что каждый канал работает на заданной длине волны, а все элементы системы спектрально выровнены в соответствии с техническими требованиями. Компоненты системы должны тестироваться в процессе их монтажа и затем регулярно тестироваться в процессе технического обслуживания. Необходимо постоянно следить за тем, чтобы важнейшие контролируемые параметры не выходили за установленные пределы. Какие именно параметры являются наиболее важными для конкретной системы WDM, зависит от протяженности оптической линии связи, скорости передачи, числа каналов и интервала между ними.

Эта глава представляет интерес для системных администраторов, специалистов и технического персонала, которые имеют дело с монтажом систем WDM, их эксплуатацией и техническим обслуживанием, а также для всех тех, кто хотел бы расширить свои знания в области тестирования систем WDM.

5.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ WDM

Значения основных параметров системы отличаются от соответствующих значений параметров отдельных компонентов. Поэтому после того, как система WDM полностью смонтирована, необходимо заново измерить значения всех ее параметров. Влияние характеристик отдельных компонентов на характеристики линии связи предсказать достаточно сложно, поскольку они в разных случаях могут усиливать, ослаблять или полностью компенсировать друг друга в зависимости от условий окружающей среды, расстояния до передатчика, оптических разъемов и соединительных шнуров. Технические характеристики систем WDM определяются в первую очередь следующими основными характеристиками отдельных компонентов:

Мощность и стабильность лазерного передатчика. Чем выше эти параметры, тем больше допустимая дальность линии связи. Однако мощность сигнала не должна быть настолько большой, чтобы стало проявляться негативное влияние нелинейных явлений в волокне.

Число каналов. Полная полоса пропускания системы определяется произведением числа каналов на скорость передачи по каналу. Например, система с 40 каналами и скоростью передачи по каждому каналу 2,5 Гбит/с (STM-16) имеет полную полосу пропускания 100 Гбит/с.

Частотный интервал между каналами. В частотном плане ITU-T стандартный частотный интервал между каналами составляет 100 ГГц (около 0,8 нм по длине

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

волны). В настоящее время рассматриваются предложения по стандартизации частотного плана с расстоянием 50 ГГц (около 0,4 нм) и даже 25 ГГц

Скорость модуляции лазерного передатчика. На линиях связи большой протяженности в настоящее время используются скорости передачи (модуляции) 2,5 Гбит/с (STM-16) и 10 Гбит/с (STM-64). Скорость передачи в сетях связи городского и регионального масштабов обычно намного меньше.

Коэффициент усиления EDFA. Стандартные усилители EDFA в пределах рабочего диапазона (шириной 40 нм) имеют типичный коэффициент усиления 30-40 дБ для слабых сигналов.

Коэффициент усиления приемника должен быть максимально высоким и стабильным.

Характеристики оптического волокна Тип и характеристики оптического волокна сильно влияют на такие параметры системы, как скорость передачи, дисперсия и максимально возможное число каналов.

Эти параметры описывают основные характеристики системы WDM, однако для полного изучения системы требуется принимать во внимание и другие факторы.

5.1.1 Коэффициент ошибок

Технические требования к линии связи обычно задаются с помощью допустимого значения коэффициента ошибок BER (Bit Error Rate), который зависит от конкретного приложения и может меняться от 10^{-3} для случая цифровой передачи голоса до 10^{-12} для передачи данных. Для того чтобы линия связи могла поддерживать большое число приложений, она должна иметь очень низкие значения BER. Система WDM должна иметь низкое значение BER на каждом из каналов по отдельности.

Рассмотрим волоконно-оптическую линию связи, рис. 5.1. Как определить на этапе проектирования, будет ли она соответствовать требованиям сетевого приложения?

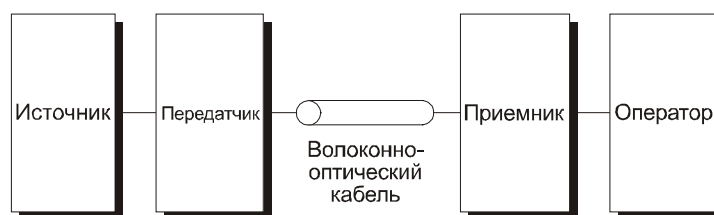


Рис. 5.1 Схема типовой линии связи с топологией "точка-точка" между источником и пользователем

Для ответа на этот вопрос рассмотрим такой параметр, как чувствительность приемника. Этот параметр показывает, при какой минимальной мощности принимаемого сигнала приемник еще обеспечивает требуемое значение BER. Чтобы определить уровень мощности сигнала, который попадает на приемник, необходимо знать бюджет линии связи – суммарные потери мощности на всех компонентах от передатчика до приемника.

Пример расчета бюджета линии связи представлен в табл. 5.1.

Таблица. 5.1 Расчет бюджета волоконно-оптической линии связи

| Характеристика | Значение | Примечания |
|---|-----------------|---|
| Выходная мощность сигнала источника излучения (P_1) | 3 дБм | Определяется производителем |
| Потери на стыковку источника с соединителем | -5 дБ | Отражение, несоответствие площадей и т.д. |
| Потери на соединителе передатчик - оптический кабель | -1 дБ | ST-соединитель, несоосность |
| Потери на стыке волокон | -0,25 дБ | Механический стык |
| Затухание в кабеле | -20 дБ | На основе паспортных характеристик или измерений оптического кабеля |
| Потери на соединителе оптический кабель – приемник | -1 дБ | ST-соединитель, несоосность |
| Бюджет линии связи (B) | -27,25 дБ | Сумма всех потерь в линии связи |
| Мощность сигнала, поступающего в приемник ($P_2=P_1-B$) | -24,25 дБм | Мощность передатчика за вычетом полных потерь |
| Чувствительность приемника (N) | -40 дБм | Определяется паспортной характеристикой линии |
| Запас потерь линии (P_2-N) | 15,75 дБ | |

Из таблицы видно, что мощность сигнала, поступающего в приемник, превышает минимально допустимый уровень, необходимый для обеспечения требуемого значения BER. Разность между ними – важная величина, которую называют запасом потерь линии связи. В нашем примере запас потерь равен 15,75 дБ. Обычно при проектировании линий связи запас потерь должен составлять не менее 10 дБ. Как бы аккуратно и тщательно не был подсчитан бюджет линии, значения каких-то величин могут оказаться больше ожидаемых; кроме того, возможно появление неучтенных источников потерь. Номинальные значения характеристик, указанные поставщиком, также иногда могут отличаться от их фактических значений. Поэтому при проектировании линии связи необходимо предусматривать некоторый запас по потерям.

Типовая схема измерения BER показана на рис. 5.2.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

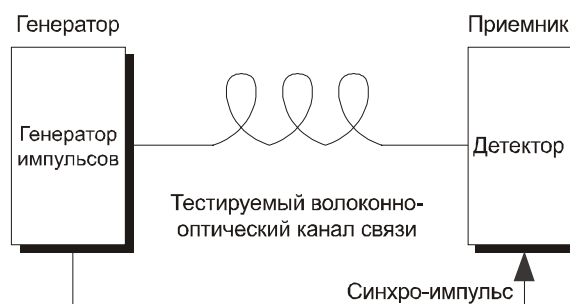


Рис. 5.2 Схема измерения величины BER с помощью генератора эталонных импульсов

5.1.2 Измерение потерь

Величина потерь зависит от конкретного элемента системы и общей длины оптического пути сигнала от передатчика. Потери возникают даже в самом высококачественном компоненте или подсистеме. Они неизбежны в соединителях, мультиплексорах, демультиплексорах и самом оптическом волокне.

Измерение потерь является основным моментом в определении характеристик линии связи. Существует много методов и критериев для измерения потерь в отдельных компонентах. Главная цель измерения потерь – определить величину полных потерь в линии связи.

5.1.3 Потери на отражение

Когда оптическое излучение попадает в какой-либо компонент системы связи, часть энергии излучения отражается обратно. Потери на отражение возникают на границах раздела оптических сред в компонентах, соединителях и стыках из-за воздушных зазоров, несоосности или различия показателей преломления.

Потери на отражение уменьшают мощность сигнала и приводят к возникновению многолучевой интерференции, которая нарушает целостность передачи данных и снижает стабильность источника излучения.

Потери на отражение зависят от качества и точности установки компонентов. Они изменяются от канала к каналу, поэтому проводить измерение потерь на отражение необходимо во всем рабочем спектральном диапазоне. Лазеры, используемые в системах DWDM, чувствительны к отраженному излучению. Отраженный сигнал может ухудшить их стабильность, уменьшить отношение сигнал/шум или полностью вывести их из строя. Нежелательные отражения в усилителях EDFA могут привести к значительному увеличению коэффициента шума. Поэтому потери на отражение в линии связи необходимо тщательно измерять до начала эксплуатации системы и постоянно контролировать в процессе эксплуатации.

Потери на отражение и коэффициент отражения

Для определения величины отраженной мощности обычно используются два понятия – потери на отражение и коэффициент отражения.

Потери на отражение ORL (Optical Return Loss) определяют интегральную характеристику линии связи – полное отражение в волоконно-оптической системе или подсистеме правее некоторой точки, в которой происходит измерение. Потери на отражение определяются формулой:

$$ORL = 10 \lg(P_{in} / P_{ref})$$

где P_{in} – мощность падающего излучения, P_{ref} – мощность отраженного излучения.

Потери на отражение ORL измеряются в дБ. Потери на отражение всегда являются положительной величиной, так как падающая мощность всегда больше отраженной. Если, например, на входе в систему мощность падающего сигнала составляет 1 мВт, а мощность отраженного сигнала 1 мкВт, то потери на отражение равны 30 дБ. Большее значение ORL соответствует меньшему количеству отраженной мощности и, следовательно, лучшим характеристикам системы.

Коэффициент отражения обычно используется для определения отражательных характеристик компонента системы (соединителя, ответвителя и т. д.) и определяется соотношением

$$K = 10 \lg(P_{ref} / P_{in})$$

где P_{ref} – мощность излучения, отраженного от исследуемого компонента (только от него!), P_{in} – мощность падающего излучения. Для того, чтобы исследовать характеристики отдельного компонента, его тестируют перед монтажом, помещая выходные участки волокон в иммерсионную жидкость с согласованным показателем преломления и высоким коэффициентом поглощения.

Коэффициент отражения измеряется в дБ и всегда является отрицательной величиной, так как отраженная мощность всегда меньше, чем падающая. Если, например, входной сигнал на соединителе имеет мощность 1 мВт, а отраженный 1 мкВт, то коэффициент отражения составляет –30 дБ. Большее отрицательное значение означает меньшую отраженную энергию и, следовательно, лучшие характеристики компонента.

5.1.4 Отношение сигнал/шум

Хотя коэффициент ошибок BER является главным параметром, дающим для внешнего приложения представление о качестве канала связи, сам этот параметр зависит от другой интегральной характеристики системы WDM, а именно от отношения сигнал/шум. Отношение сигнал/шум OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) является неотъемлемой характеристикой любой системы WDM и отражает превышение мощности принимаемого сигнала над шумовым фоном для каждого оптического канала. Чем больше OSNR, тем легче идентифицировать принимаемые биты сигнала на уровне шума.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

Согласно теореме Шеннона, за счет помехоустойчивого кодирования можно добиться сколь угодно низкого уровня BER для любого заданного отношения сигнал/шум OSNR при сколь угодно малой избыточности. Утверждение теоремы “ослабляет” влияние OSNR на BER. Однако на практике, чем меньше OSNR, тем более сложная требуется схема кодирования для того, чтобы получить требуемый уровень BER. Поэтому в системах WDM стремятся обеспечить низкий уровень шумов и соответственно высокое значение OSNR.

Зависимость OSNR от длины волны графически представлена на рис. 5.3. На выходе из первого мультиплексора это отношение должно быть не меньше 40 дБ для каждого канала. Оптические усилители в линии связи достаточно сильно ухудшают OSNR. По мере прохождения сигнала по линии связи значение OSNR может снижаться в зависимости от протяженности линии, числа усилителей EDFA и скорости передачи. Каждый отдельный усилитель EDFA не должен ухудшать значение OSNR больше чем на 3-7 дБ. На входе в приемник значение OSNR должно быть не хуже 20 дБ.

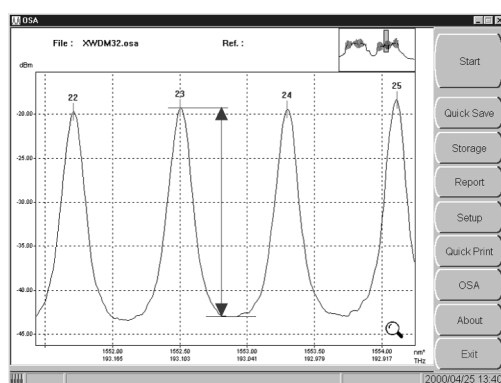


Рис. 5.3. Зависимость мощности составного сигнала от длины волны. Значение SNR определяется как отношение пиковой мощности канала к мощности шумов на половине расстояния между смежными максимумами.

Оптические шумы стали предметом повышенного внимания только после появления в системах передачи оптических усилителей. Дело в том, что оптические усилители не являются регенераторами (не фильтруют шум, а только восстанавливают амплитуду сигнала), и по мере прохождения усилителей EDFA в линии связи происходит накопление шума в сигнале. Шумы возникают в основном из-за усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission) в усилителях EDFA. Несмотря на то, что усилители EDFA обязательно тестируются производителем, их характеристики необходимо дополнительно проверить после монтажа, когда на линии связи установлены все усилители и подключены все каналы. В системах с большим числом усилителей следует тщательно учитывать зависимость коэффициента усиления от длины волны, так как она непосредственно влияет на равномерность спектра сигнала в системе. Явление ASE ухудшает отношение сигнал/шум во всех оптических каналах, что может быть особенно существенным для определенных конфигураций линии связи.

Коэффициент усиления системы может изменяться во времени из-за колебаний температуры, появления локальных напряжений в волокне, деградации компонентов и, разумеется, при изменении конфигурации сети связи.

Значение OSNR (дБ) в системе WDM необходимо измерять для каждого рабочего канала. В соответствии с рис. 5.3, это отношение определяется следующим образом:

$$OSNR = \min_i [10 \lg(P_i / N_i) + 10 \lg(B_m / B_r)]$$

где: P_i – мощность оптического сигнала в каждом i -м канале, B_r – базовая оптическая ширина полосы (по частоте или длине волны), которая обычно составляет 0,1 нм, N_i – интерполированное значение измеренной мощности шумов в эквивалентной шумовой полосе (по частоте или длине волны) B_m для каждого i -го канала:

$$N_i = [N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)]/2$$

где $\Delta\lambda$ – интерполяционный сдвиг по длине волны, равный или меньший половины интервала между каналами.

При недостаточно высоком значении отношения сигнал/шум его необходимо повышать путем изменения конфигурации системы. Обычно это достигается за счет установки дополнительных оптических усилителей на соответствующие участки линии связи. Отношение сигнал/шум служит мерой качества сигнала и является важнейшим параметром линии связи, который обязательно подлежит тщательному измерению.

5.1.5 Коэффициент усиления

Оптические сигналы на пути своего распространения от источника излучения до конечного приемника многократно испытывают преобразования. В оптической сети с усилителями EDFA коэффициент усиления для каждого канала зависит от количества каналов, проходящих через усилитель, рис. 5.4. Поэтому необходимо иметь возможность определять отношение сигнал/шум на входе в приемник для каждого канала и устанавливать причину любых расхождений, что не всегда возможно на основе общих измерений. Вывод о работоспособности или неработоспособности системы можно сделать на основе измерения полной мощности сигнала и мощности сигналов в каждом канале. Но для выяснения причин появления каналов с малым уровнем мощности в первую очередь потребуется проверить равномерность усиления отдельных усилителей, изучить изменение поляризации и определить нелинейные эффекты вдоль всей линии связи. Все это требует получения точной спектральной информации об оптическом сигнале в линии связи.

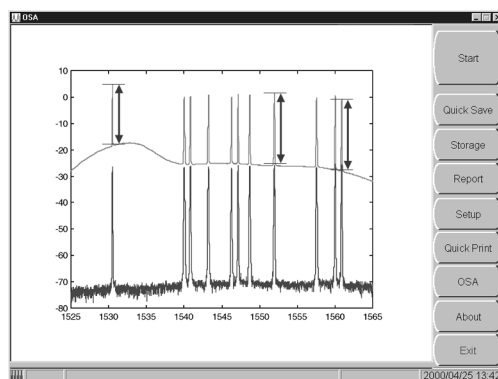


Рис. 5.4. Спектральная зависимость коэффициента усиления усилителя EDFA

5.1.6 Центральная длина волны канала

Центральная длина волны канала в составном оптическом сигнале – наиболее важная характеристика канала. От стабильности центральной длины волны в конечном счете зависит возможность связи между передатчиком и приемником.

После монтажа системы связи необходимо точно измерить значения центральных длин волн для каждого канала, чтобы убедиться, что они соответствуют техническим требованиям. Их также необходимо постоянно контролировать в процессе эксплуатации сети для выявления недопустимых их смещений. Точность измерения центральной длины волны отдельного канала приобретает тем большую значимость, чем уже полоса частот отдельного канала и меньше интервал между каналами, рис. 5.5.

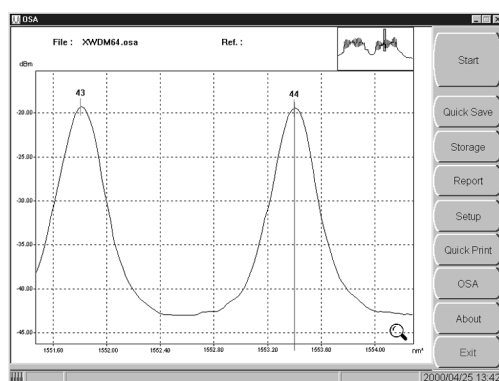


Рис. 5.5 Измерение центральной длины волны в системе с частотным интервалом между каналами в 50 ГГц

В коммутируемых оптических сетях DWDM необходима всесторонняя, тщательно разработанная стратегия выбора длин волн, позволяющая избежать конфликтов в распределении каналов и минимизировать возможное взаимодействие между ними. Международным стандартом частотный интервал между каналами определен в 100 ГГц (около 0,8 нм). Такой частотный интервал позволяет достичь хорошего соотношения между пропускной способностью системы и уровнем технических требований к компонентам, оставляя при этом необходимый допуск по частоте для остального оборудования на линии связи. В настоящее время многие производители выпускают оборудование для систем DWDM с частотным интервалом между каналами 50 ГГц и меньше.

Ширина полосы каждого канала в системах DWDM является достаточно узкой. Даже небольшие смещения по длине волны в лазерах с распределенной обратной связью DFB (Distributed Feedback), которые используются в качестве источников излучения, могут привести к недопустимому снижению уровня сигнала на конце приемника. Поэтому стабильность и спектральная чистота источника излучения имеют первостепенное значение для систем DWDM. Особое внимание следует уделять подавлению боковых мод излучения, поскольку они увеличивают шумы в соседних каналах систем DWDM. В сетях SDH используются старые модели лазеров, которые не стабилизированы по частоте и не удовлетворяют всем указанным выше требованиям. Однако в системах DWDM можно использовать существующее оборудование сетей SDH. Для этого требуется заменить источники излучения спектрально стабилизированными лазерами DFB (или поставить транспондерные модули, которые

выполняют конвертацию рабочей длины волны устройства в длину волны канала DWDM и обратно). В некоторых случаях сигнал управления лазерами стандарта STM-16 можно непосредственно подавать на вход лазера DFB.

5.1.7 Дрейф длины волны и мощности сигнала

Абсолютно стабильных источников излучения не существует. Мощность сигнала и центральная длина волны всегда как-то изменяются во времени. На рис. 5.6 показаны типичные вариации мощности и центральной длины волны источника излучения за время наблюдения, равное 12 часам. Причиной постоянного ухода частоты и мощности являются изменения температуры, обратное отражение и чирпирование частоты излучения лазера.

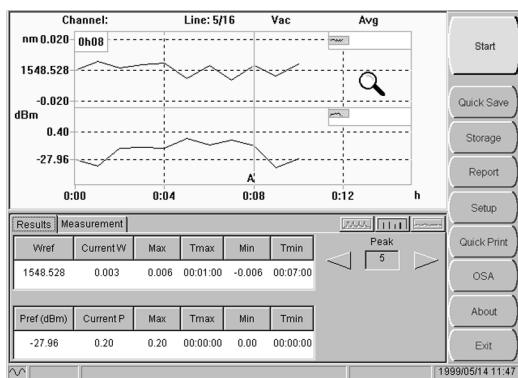


Рис. 5.6 Вариации центральной длины волны и мощности сигнала во времени

Параметры сигнала каждого канала, ни при каких обстоятельствах не должны выходить за пределы диапазона допустимых отклонений. Слишком большой уход длины волны может привести к полной потере сигнала в канале, а также к интерференции с сигналом соседнего канала и значительному ухудшению его качества. Для того чтобы избежать потерь данных в линии связи, необходимо постоянно измерять и контролировать уход мощности и длины волны излучения оптического сигнала.

5.1.8 Перекрестные помехи

Перекрестные помехи – это нежелательный вклад сигнала одного канала в сигналы других каналов. Уровень перекрестных помех достаточно сложно точно определить до завершения монтажа и запуска системы. Перекрестные помехи необходимо измерять в реальной ситуации при наличии (или, по крайней мере, симуляции) фактических сигналов.

Расчет перекрестных помех подробно обсуждался в разделе 4.4.1. Для их определения необходимо исследовать форму спектра мощности сигналов двух соседних каналов и проверить, можно ли пренебречь вкладом сигнала одного канала в сигнал другого канала. Нормальным считается различие по мощности между полезным сигналом и суммарным паразитным сигналом от остальных каналов в 25 дБ, рис. 5.7. Для линий связи большой протяженности допустимым значением является уровень перекрестных помех в 17 дБ, а для подводных линий связи считается достаточным уровень в 13 дБ.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

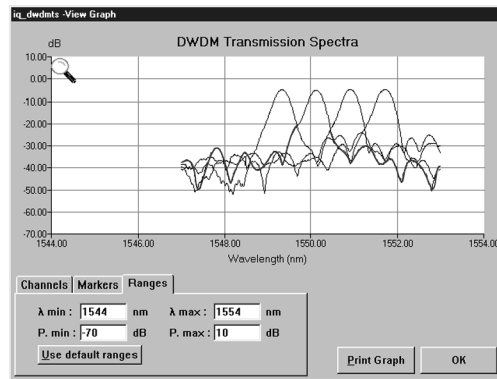


Рис. 5.7 Перекрестные помехи в смежных каналах (выделены жирной линией для второго канала слева)

Расчеты, основанные на результатах измерений до полной установки системы, могут дать лишь приблизительное значение уровня перекрестных помех. Измерение уровня перекрестных помех необходимо проводить, когда все компоненты системы полностью собраны в единое целое. Такие измерения следует периодически проводить в процессе эксплуатации, чтобы быть уверенным в качестве передачи сигнала.

5.1.9 Нелинейные эффекты

Нелинейные эффекты, которые обычно не проявляются при тестировании волокон, могут стать существенными только после ввода сети связи в эксплуатацию. Подключение и запуск оборудования могут привести к появлению нелинейных эффектов, рассмотренных в разделе 3.3.4. Все нелинейные возмущения следует контролировать как в процессе запуска оборудования, так и периодически в процессе эксплуатации всей сети связи.

5.1.10 Четырехволновое смещение

Из множества нелинейных эффектов особо выделяют четырехволновое смещение FWM, которое требует особого внимания из-за серьезности последствий его воздействия на работу сети. Нелинейное взаимодействие оптических сигналов может приводить к появлению паразитных сигналов, длины волн которых могут совпадать с длинами волн соседних каналов и нарушить работу сети, рис. 5.8.

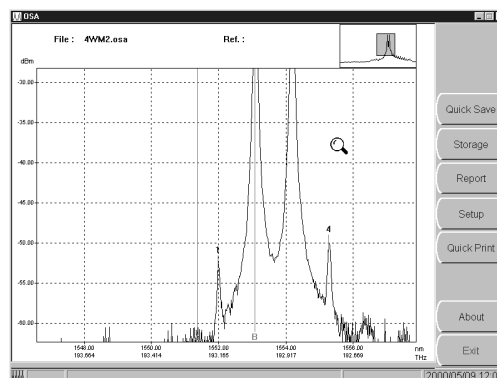


Рис. 5.8. Два паразитных боковых пика в спектре сигнала из-за четырехволнового смещения

Хотя эффект FWM по своему результату подобен перекрестным помехам, его влияние не ограничивается двумя взаимодействующими каналами. Влияние FWM зависит от относительной поляризации двух взаимодействующих сигналов, их мощности и частотного интервала между каналами.

Эффект FWM может быть уменьшен за счет увеличения частотного интервала между каналами или использованием неравномерных частотных интервалов между каналами, хотя это и сложно обеспечить после проектирования и запуска системы в эксплуатацию. Если система еще не смонтирована, четырехволновое смещение можно уменьшить, используя волокно с подходящей хроматической дисперсией. Поскольку четырехволновое смещение потенциально может быть скомпенсировано, важно знать его точную величину.

5.1.11 Поляризационная модовая дисперсия

На участках волокна большой протяженности, типичных для реальных сетей связи, поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion) возникает по ряду причин: из-за внутренних неоднородностей волокна, механических возмущений в местах сгибов и напряжений волокна, разнообразных температурных эффектов, рис.5.9. Все эти эффекты имеют псевдослучайную природу, а потому явление PMD наиболее удобно описывать с помощью формулы:

$$PMD = \sqrt{\langle DGD^2 \rangle}$$

где DGD (Differential Group Delay) – дифференциальная групповая задержка. Хотя величина DGD зависит как от длины волны, так и от температуры, в большинстве случаев достаточно знать ее среднее значение, чтобы определить длину волокна, при которой явление PMD начнет приводить к ухудшению характеристик сети связи.

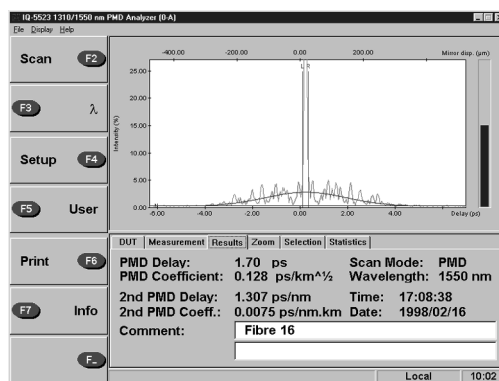


Рис. 5.9. Типичное измерение PMD

Ранее мы отмечали, что характер явления PMD зависит от степени связи ортогональных по поляризации мод в оптическом волокне. Практически можно считать, что переход между двумя состояниями поляризации происходит на длине связи мод в волокне L_c , на которой происходит обмен мощностью между модами с различными состояниями поляризации. Для реальных волокон значение L_c редко превышает 1 км и обычно не более 300 метров. Поэтому большая часть существующих сетей, в которых протяженность линий связи L значительно больше длины связывания

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

($L \gg L_c$), работает в условиях интенсивного случайного взаимодействия мод ортогональных поляризаций. В этом случае PMD зависит от расстояния по формуле:

$$PMD = K_{PMD} \sqrt{L}$$

где K_{PMD} – коэффициент PMD, имеющий размерность пс/км^{1/2}. Физический смысл коэффициента PMD – дисперсия PMD на 1 км волокна.

Особое внимание следует уделять явлению PMD в оптических кабелях, проложенных в конце 80-х годов. Тогда технология производства волокна не была так совершенна, как сейчас, и явление PMD не было еще хорошо изучено. Сегодня производители волокна хорошо понимают, насколько важно поддерживать близкую к идеальной геометрию сердцевин по всей длине волокна, и стараются не создавать излишних изгибов и напряжений при перематывании кабеля на катушки. Операторы сетей связи научились учитывать воздействие внешних условий на явление PMD. Но многие километры кабелей различных типов и возрастов, которые проложены с конца 80-х годов, представляет определенную сложность для операторов сетей связи, которые хотят увеличить пропускную способность линий до уровня STM-64.

5.1.12 Хроматическая дисперсия

Тщательно подобрав и соответствующим образом контролируя величину хроматической дисперсии, можно уменьшить некоторые нелинейные эффекты и даже извлечь из них определенную пользу. В некоторых случаях удается при приемлемом уровне полной дисперсии минимизировать различные нелинейные эффекты в волокне. В будущем, когда операторы начнут изучать возможности модернизации существующих сетей, полевые измерения хроматической дисперсии будут приобретать все большую значимость.

5.1.12 Другие параметры систем WDM

На технические характеристики компонентов волоконно-оптических линий связи также влияет ряд других параметров и факторов, к которым относятся:

- Параметры, связанные с перекрестными помехами:
 - уровень перекрестных помех в пределах полосы (дБ);
 - уровень перекрестных помех за пределами полосы (дБ);
- Параметры, связанные с частотой сигнала:
 - пульсации (дБ);
 - вносимые потери (дБ);
 - ширина канала (ГГц);
- Параметры, связанные с поляризацией:
 - дифференциальная групповая задержка DGD (пс);
 - полные потери, зависящие от поляризации PDL (дБ);
- Уменьшение отношения сигнал/шум (дБ), связанное с деградацией лазера, оптического усилителя и других компонентов системы WDM;

Большинство этих понятий рассмотрено в главах 3 и 4.

5.2. МОНТАЖ И НАЛАДКА СИСТЕМ WDM

Перед монтажом и вводом в эксплуатацию системы WDM необходимо провести всестороннее тестирование существующей оптической линии. Если в новой системе WDM будет применяться уже имеющееся оборудование связи, необходимо убедиться в их совместимости друг с другом. Есть несколько типов тестов, которые позволяют проконтролировать работу системы WDM.

Для оператора сети связи желательно свести к минимуму число тестов, необходимых для подтверждения работоспособности системы и целостности передачи сигналов. Имеется большое количество документации по процедурам тестирования и сдачи в эксплуатацию систем оптической связи SDH с одним оптическим каналом, однако при использовании новых технологий, таких как WDM, этой документации явно недостаточно. Требуется учитывать дополнительные свойства оптических компонентов и характеристики кабеля, контролировать которые не было необходимости при использовании одноволновой передачи. Появление оптических мультиплексоров ввода/вывода, открывшее возможность маршрутизации оптических каналов с различными длинами волн в сложных сетях, значительно усложнило процедуры тестирования при монтаже, наладке и техническом обслуживании систем WDM. Оптическая кросс-коммутиция может в будущем радикально изменить конфигурацию сетей связи, что потребует применения еще более сложных методов тестирования таких сетей.

Ниже мы попытаемся определить набор тестов для проверки работоспособности систем WDM и основных характеристик сети, включая передачу оптического сигнала, мультиплексирование, управление, мониторинг характеристик и живучесть сети. Все тесты разделяются на пять категорий:

- тесты на сетевую совместимость;
- сдаточные тесты (перед вводом в эксплуатацию);
- тесты при техническом обслуживании и мониторинге;
- тесты на совместимость с оборудованием других производителей;
- тесты на целостность внутренних соединений сети.

5.2.1 Тесты на сетевую совместимость

Тесты на сетевую совместимость необходимы для проверки совместимости волоконно-оптических и электрических интерфейсов существующих сетей и компонентов сети WDM. Важнейшие из этих тестов – измерение затухания сигнала в линии, измерение потерь на отражение и измерение поляризационной и хроматической дисперсий.

Измерение затухания в линии на длине волны 1310 нм и 1550 нм позволяет выявить оптические неоднородности в волокне и определить, соответствует ли волокно заданным требованиям. Измерение мощности отраженных сигналов от соединителей и мест стыковки волокон позволяет определить допустимые пределы уровней одиночного и многократных отражений.

Измерение хроматической и поляризационной модовой дисперсий при монтаже современных оптических кабелей обычно не проводится (кроме случаев, когда в системе применяют компенсацию дисперсии), поскольку эти параметры волокон

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

указываются производителем кабеля. Однако измерение дисперсии становится необходимым для систем с высокой скоростью передачи (STM-64), если предполагается использовать оптические кабели старой прокладки, а также в тех случаях, когда из-за большой протяженности линии связи дисперсия в волокне достигает максимально допустимых значений.

5.2.2 Тесты при пуско-наладочных работах и вводе в эксплуатацию

Перед вводом в эксплуатацию необходимо провести всестороннее тестирование характеристик передачи сигнала, включая измерение параметров передатчиков и приемников и изучение поведения ошибок передачи. Длина волны излучения лазера может смещаться из-за отклонений тех или иных контрольно измерительных параметров в процессе производства, температурных сдвигов и т.д. Аналогичного может происходить уширение спектральной полосы излучения лазера. При этом важно, чтобы смещение центральных длин волн каналов, а также уширение спектров канальных лазеров было в пределах допустимых значений.

Оптическое тестирование линий связи необходимо производить, когда система полностью смонтирована, а все компоненты согласованы и работают совместно. Дисперсию в линии связи между передатчиком и приемником необходимо измерять на каждой рабочей длине волны, включая вводимые или выделяемые оптические каналы в промежуточных точках, и убеждаться, что во всех случаях она находится в допустимых пределах. Следует измерить оптическую мощность и отношение сигнал/шум OSNR на входе в приемник. Для балансировки уровней OSNR всех каналов системы DWDM используют анализатор оптического спектра OSA, наблюдая с его помощью за изменениями OSNR при варьировании уровня сигнала передатчиков.

Возможное число длин волн в системе WDM ограничено рабочим диапазоном усилителей, перекрестными помехами, смещениями мощности и центральных длин волн каналов в компонентах, нелинейностями волокна и точностью выравнивания многоступенчатых фильтров. Для компенсации потерь мощности сигнала широко используются оптические усилители, но при этом необходимо тщательно учитывать влияние накопления шумов и перекрестное насыщение усиления, чтобы минимизировать отклонения мощности сигнала. Важнейшие параметры, которые необходимо измерить перед вводом системы в эксплуатацию – длина волны каждого канала, амплитуда смещения уровня мощности и центральной длины волны канала, оптическое отношение сигнал/шум, частотный интервал между каналами, изоляция каналов, вносимые потери, шумы усилителя, равномерность коэффициента усиления, относительный уровень ошибок, нестабильность (дрожание) сигнала и временная задержка передачи. Каждый из этих тестов будет подробно рассмотрен в разделе 5.3.

5.2.3 Тесты при техническом обслуживании и мониторинге

К этой категории относятся тесты, используемые для проверки работоспособности сети и ее элементов. Наряду с тестированием работы сети проверяется и система сетевого управления – ее функции, сетевые элементы, ответственные контроль связи между удаленными узлами и способные локализовать неисправность на линии связи или обеспечить переключение на резервные каналы/элементы системы связи.

Техническое обслуживание систем WDM означает поддержание всех параметров системы в заданных пределах, в частности, обеспечение стабильности длины волны оптических каналов и заданного уровня мощности оптического сигнала. При тестировании этих параметров используются отдельные каналы связи между сетевыми элементами (СЭ) системы WDM (СЭ/СЭ) и между операционной системой (ОС) и сетевыми элементами (ОС/ЭС), которые организуются через встроенные каналы передачи данных DCC (Data Communications Channel), локальную сеть передачи данных LAN (Local Area Network) или контрольные оптические каналы OSC (Optical Supervisory Channel). Тесты, проводимые в процессе технического обслуживания, будут подробно рассмотрены в разделе 5.4.

К этой группе относится также мониторинг характеристик сети и выявление неполадок. Необходимо постоянно контролировать работоспособность сети, ее безопасность и важнейшие параметры, включая управление сетью. Администратор сети должен иметь возможность полного контроля состояния всей сети. Для наблюдения за параметрами линии связи и передачи информации о состоянии сети может использоваться отдельный, специально предназначенный для этого контрольный канал. Также как и полная система наблюдения за сетью RFTS (Remote Fiber Test System), он будет более подробно рассмотрен в разделе 5.5.

5.2.4 Тесты на совместимость с оборудованием других производителей

Эти тесты проводятся для того, чтобы определить, может ли система взаимодействовать с оборудованием других производителей.

Достаточно часто при подключении оборудования других производителей приходится использовать оптические преобразователи, что приводит к увеличению сложности и стоимости системы. Чтобы избежать этого, физические характеристики сигнала (длина волны, скорость передачи, формат кодировки) на интерфейсах сети должны быть стандартизированы. Международные организации по стандартизации (ITU и другие) активно занимаются разработкой стандартов для оптических интерфейсов, архитектур сетей, систем управления, а также для процедур тестирования, позволяющих устанавливать соответствие интерфейсов определенным стандартам.

5.2.5 Тесты на целостность внутренних соединений сети

К этой категории относятся тесты для проверки работоспособности и безотказности работы внутренних соединений сети. Еще недавно системы WDM использовались в основном на протяженных линиях связи с топологией “точка-точка”, и безотказность работы оптической сети практически полностью обеспечивалась на электронном уровне с помощью аппаратуры SDH. Однако конфигурация современных сетей, в которых используются оптические мультиплексоры ввода/вывода OADM, может

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

динамически изменяться. В ближайшем будущем появятся мощные коммутаторы и маршрутизаторы, способные обеспечить маршрутизацию оптических каналов с различными длинами, а также устройства оптической кросс-коммутации, позволяющие создавать сети с более гибкими топологиями. Значительное внимание уделяется построению сетей с восстанавливаемой топологией, основанной на самовосстанавливающихся кольцах, разнотипной маршрутизации и алгоритмах распределения на основе ячеистых архитектур. В свете этих технологических достижений осуществление полного контроля в сети и ее защита становятся невероятно сложными. Тем не менее, контролировать целостность всех внутренних соединений сети необходимо, чтобы гарантировать надежность и безотказность предоставляемых услуг.

Развитие технологии WDM позволяет операторам связи более полно использовать потенциально возможную пропускную способность волоконно-оптических сетей. Разные производители сетевых компонентов используют различные методы для увеличения полосы пропускания. Одни стремятся увеличить число каналов за счет расширения рабочего диапазона систем WDM и/или уменьшения частотного интервала между каналами, другие пытаются увеличить скорость передачи в каждом канале. Какой бы путь не был выбран, вместе с развитием сетевых технологий будет расти и необходимость в соответствующих методах тестирования, и они также должны постоянно совершенствоваться, чтобы соответствовать изменяющимся условиям.

5.3 ВВОД СИСТЕМ WDM В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Перед вводом сети связи в эксплуатацию, необходимо провести измерения и задокументировать ряд важнейших ее характеристик, которые обеспечат основу для выявления неполадок в процессе эксплуатации и в будущем могут понадобиться для планирования модернизации сети. Очень важно правильно протестировать сеть перед ее вводом в эксплуатацию, поэтому многие производители систем WDM разрабатывают и предлагают собственные комплексы испытательных тестов. Целью такого тестирования является проверка общих характеристик сети и демонстрация ее целостности и работоспособности.

Эта категория тестов включает три серии тестов. Сначала замеряются характеристики всех компонентов системы – необходимо убедиться в том, что характеристики системы в целом соответствуют техническим требованиям. В последнюю очередь проводится тестирование системы с разрывом соединений, т.е. с нарушением ее целостности. Несмотря на то, что этот третий этап исключительно важен, о нем часто забывают. Только после того, как проведены все эти тесты и проверена работоспособность всех компонентов на их соответствие стандартам, можно приступать к эксплуатации системы WDM.

5.3.1 Передатчики

Мощность выходного сигнала передатчика измеряют с помощью измерителя мощности оптического излучения, анализатора оптического спектра OSA и калиброванного перестраиваемого аттенюатора, рис. 5.10. При этом следует оценивать ошибки измерений и записать результаты измерений в соответствующем виде: $X \pm Y$ дБм. Центральную длину волны излучения лазера измеряют с помощью калиброванного

многоволнового измерителя MWM (Multiwavelength Meter) и сравнивают полученные результаты с частотным планом ITU.

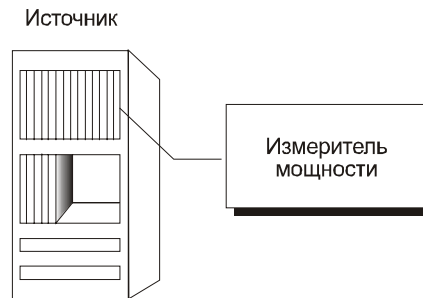


Рис. 5.10. Измеритель мощности оптического сигнала позволяет с высокой точностью определить мощность выходного сигнала передатчика

5.3.2 Приемники

Чувствительность приемника – минимальная мощность входного сигнала для заданного коэффициента ошибок BER. Ее измеряют с помощью тестера уровня ошибок BER, перестраиваемого аттенюатора и измерителя мощности, рис. 5.11. Она должна быть измерена для всех каналов частотного плана ITU, которые предполагается использовать в системе.

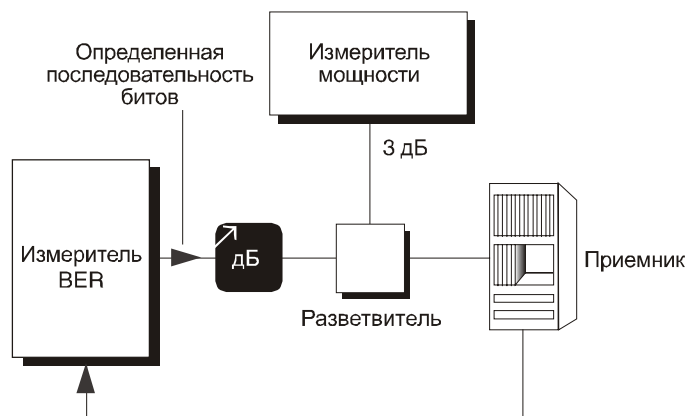


Рис. 5.11 Тестер BER позволяет определить уровень чувствительности приемника

Для определения уровня перекрестных помех обычно по очереди измеряют паразитный сигнал в каждом канале при отсутствии входного сигнала в этом канале и наличии сигналов во всех остальных каналах. Многие современные анализаторы оптического спектра OSA позволяют непосредственно измерять значение перекрестных помех, рис.5.12, 5.13.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

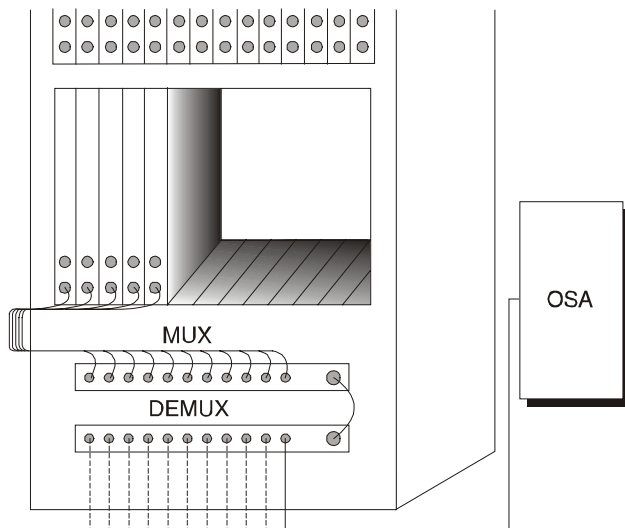


Рис. 5.12 Анализатор OSA позволяет измерять перекрестные помехи на конце приемника.

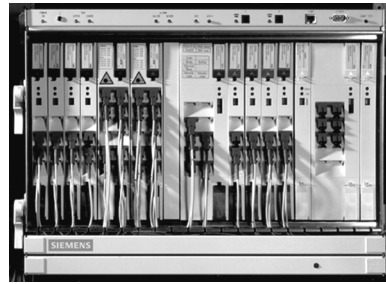


Рис. 5.13 Трансивер (передатчик/приемник) компании Siemens. (Фотография опубликована с разрешения компании Siemens)

5.3.3 Оптические усилители

Мощность сигнала на выходе усилителя EDFA измеряется в режиме его насыщения, то есть когда увеличение мощности входного сигнала уже не приводит к увеличению мощности выходного сигнала. Измерения производятся на длине волны 1550 нм с использованием перестраиваемого лазера и калиброванного измерителя мощности, рис. 5.14.

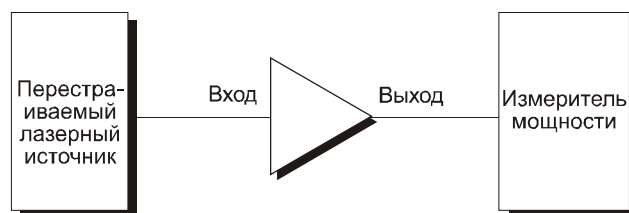


Рис. 5.14 Определение полосы усиления EDFA с помощью перестраиваемого лазера

Равномерность усиления для составных сигналов измеряют подобным образом, при этом длину волны входного сигнала изменяют в полосе в окрестности длины волны 1550 нм с шагом 1 нм и записывают результаты для каждой длины волны.

Рабочая полоса усилителя EDFA определяется по уровню уменьшения коэффициента усиления на 3 дБ по сравнению с максимумом. Для измерения рабочей полосы используют анализатор оптического спектра OSA, рис. 5.15. Рабочая полоса усилителя EDFA должна составлять не менее 32 нм (от 1530 до 1562 нм).

Остаточная мощность накачки – это мера утечки энергии накачки из усилителя EDFA. Ее измеряют отдельно на входе и на выходе усилителя с помощью анализатора

оптического спектра OSA (на входе – на длине волны 980 нм, на выходе – на длине волны 1480 нм).

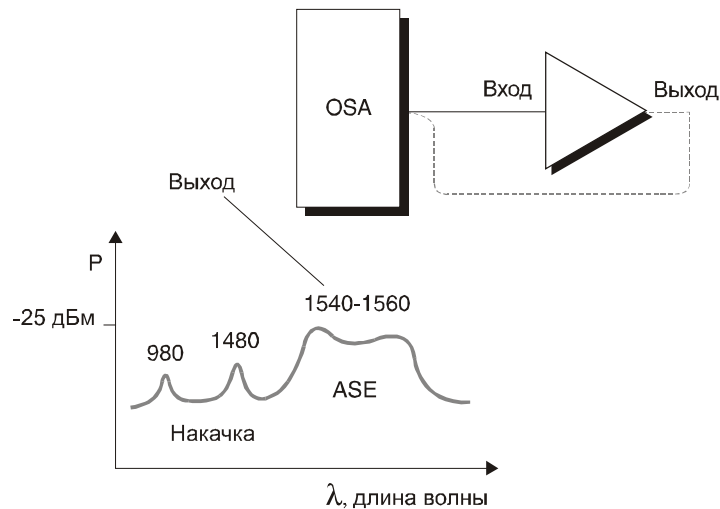


Рис. 5.15 Измерение ширины полосы рабочего диапазона с помощью анализатора OSA

Усиленная спонтанная эмиссия ASE (Amplified Spontaneous Emission) также измеряется на входе и на выходе усилителя. Вся рабочая полоса усиления сканируется с помощью анализатора оптического спектра. При этом результат обычно представляют в виде спектральной плотности мощности (единицы измерения: дБм/нм или дБм/0,1 нм).

5.3.4 Мультиплексоры и демультиплексоры

Именно правильная работа мультиплексоров и демультиплексоров обеспечивает высокую пропускную способности сети. В процессе тестирования необходимо проверить на соответствие заданным значениям целый ряд параметров мультиплексоров и демультиплексоров. Все измерения должны проводиться в стабильных условиях и в комбинации с другими компонентами, характеристики которых уже определены. Тестирование линии связи проводят на всех длинах волн, которые используются или могут быть использованы в будущем.

Тестирование демультиплексоров проводят при разных уровнях мощности входного сигнала и допустимом относительном уровне ошибок BER на выходе при подаче на вход сигнала непосредственно от усилителя EDFA. Эти измерения выполняются на одном из концов линии связи с помощью тестера BER, рис.5. 16.

Неравномерность распределения мощности выходного сигнала мультиплексора определяется как максимальный разброс между уровнем мощности различных каналов в составном сигнале (для всех активных каналов). Эта величина измеряется анализатором оптического спектра OSA. Неравномерность распределения мощности не должна превышать 3 дБ, чтобы не допустить существенного рассогласования характеристик сигналов в различных каналах.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

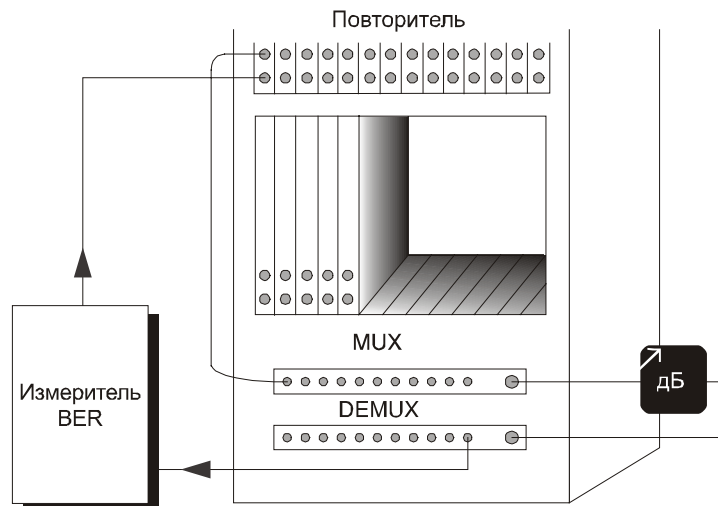


Рис. 5.16. Определение BER в одной стойке системы WDM с помощью аттенюатора, симулирующего потери в линии

Соответствующий параметр для демультиплексора – мощность выходного сигнала в каждом канале. Эта величина измеряется калиброванным измерителем мощности и обычно составляет около -20 дБм, рис. 5.17.

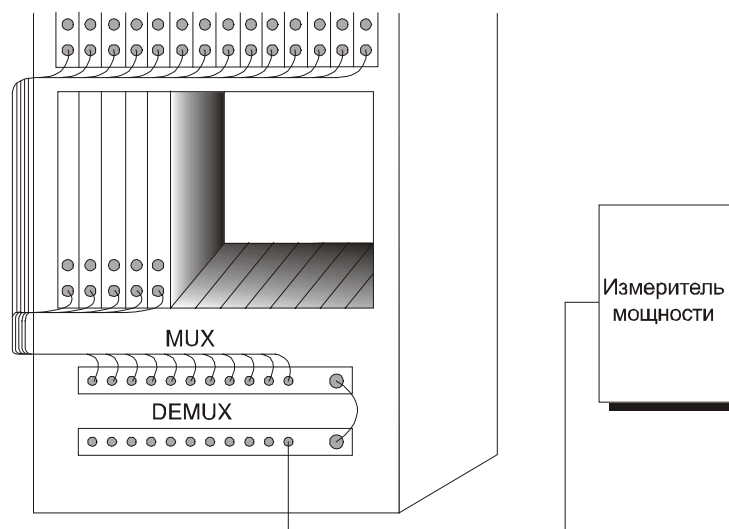


Рис. 5.17. Измерение распределения мощности выходного сигнала между каналами с помощью измерителя мощности

Вносимые потери тесно связаны с неравномерностью распределения мощности по каналам. Величина потерь, вносимых мультиплексором в каждый канал, измеряется с помощью перестраиваемого лазера (либо набора передатчиков с разными длинами волн) и анализатора оптического спектра OSA, с помощью которого последовательно измеряют входной и выходной сигнал для каждого канала, рис. 5.18. Можно также провести такие измерения с помощью измерителя мощности, последовательно включая передатчики с разными длинами волн.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

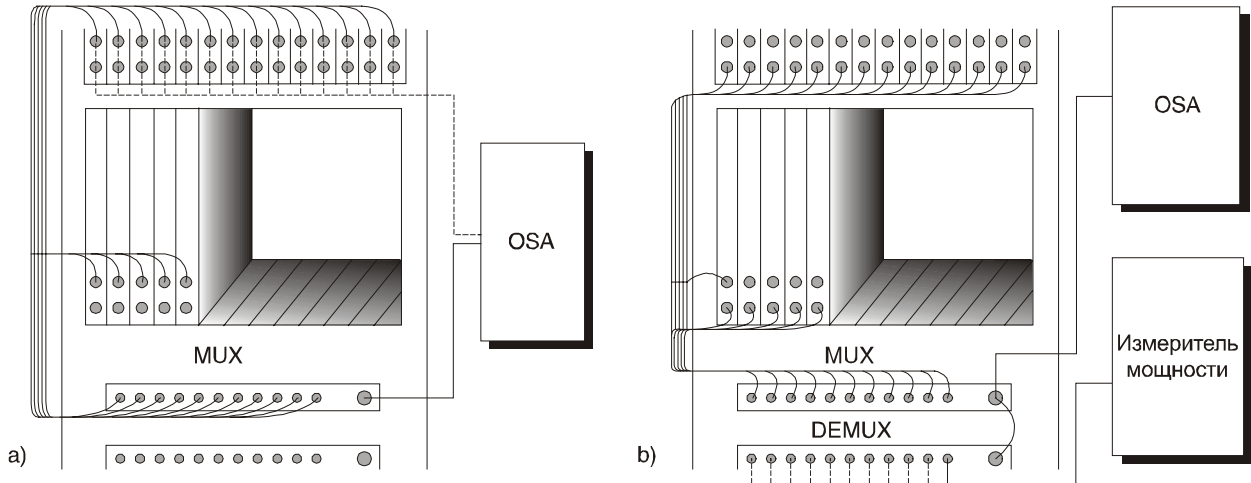


Рис. 5.18 Измерение вносимых потерь с помощью:
 а) анализатора оптического спектра OSA для мультиплексора;
 б) измерителя мощности для демультиплексора

Важными характеристиками мультиплексоров и демультиплексоров являются центральная длина волны и ширина полосы отдельных каналов. Кроме этого необходимо провести измерение уровня перекрестных помех между каналами. Эти измерения проводятся с помощью анализаторов оптического спектра OSA и многоволнового измерителя (для калибровки OSA), рис. 5.19. В большинстве случаев центральная длина волны должна соответствовать значениям частотного плана ITU. Ширина полосы каждого канала (по уровню мощности 3 дБ) не должна превышать 0,2 нм.

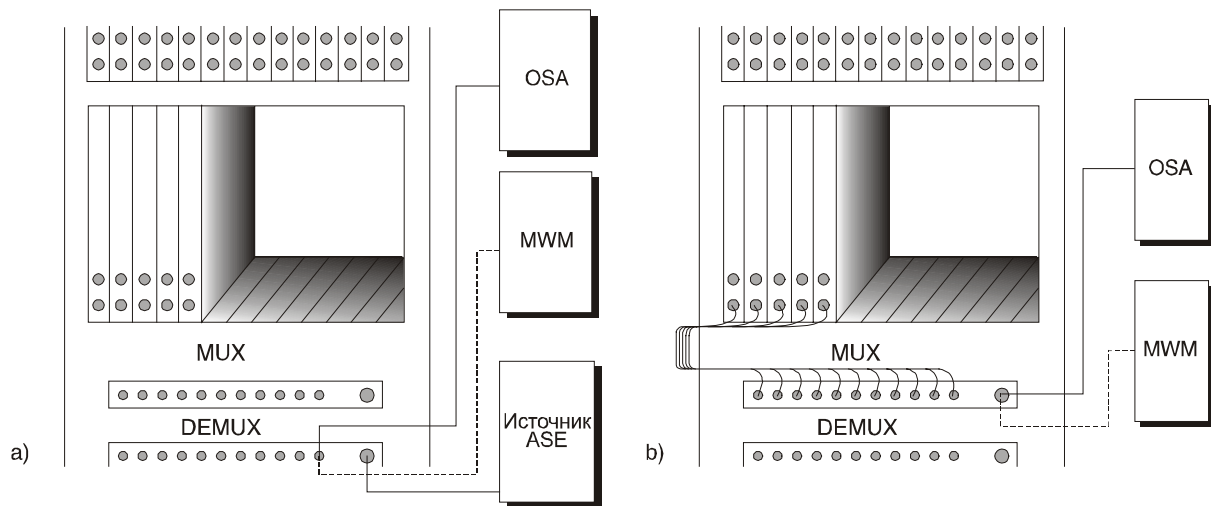


Рис. 5.19 Измерение центральной длины волны канала с помощью:
 а) источника ASE и анализатора оптического спектра OSA для демультиплексора;
 б) анализатора оптического спектра OSA и имеющихся в системе передатчиков для мультиплексора

Направленность особенно существенна для мультиплексоров и ее также измеряют при сдаче в эксплуатацию. Лазерный сигнал подают на один из входов мультиплексора и исследуют все остальные входы с помощью анализатора OSA, рис. 5.20.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

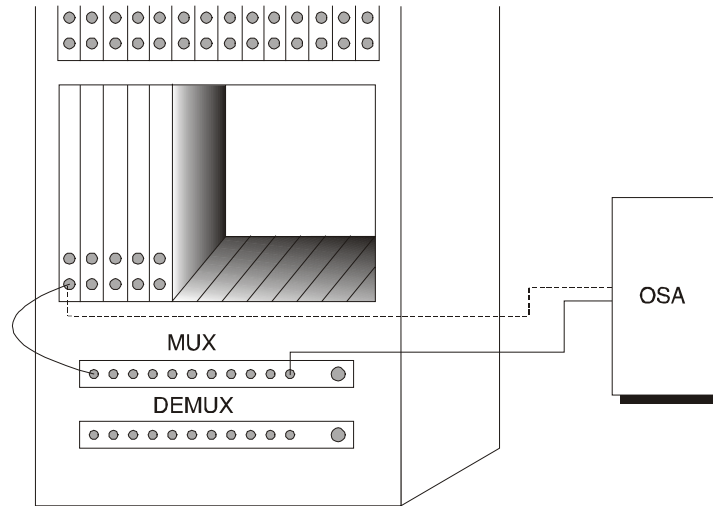


Рис. 5.20 Измерение направленности мультиплексора с помощью анализатора оптического спектра OSA

5.3.5 Тестирование системы в целом

Наряду с тестированием отдельных компонентов и составных частей системы, важным этапом сдачи сети в эксплуатацию является также проверка характеристик системы в целом. Цель такой проверки – показать работоспособность сети и целостность передачи данных во всех каналах.

Обычно составной сигнал систем DWDM проходит через один или несколько усилителей, после чего демультиплексор выделяет из него отдельные каналы.

Чаще всего для описания характеристик систем DWDM в качестве единого параметра используют отношение сигнал/шум OSNR. Измерения проводятся при помощи анализатора OSA в нескольких точках линии связи, рис. 5.21.

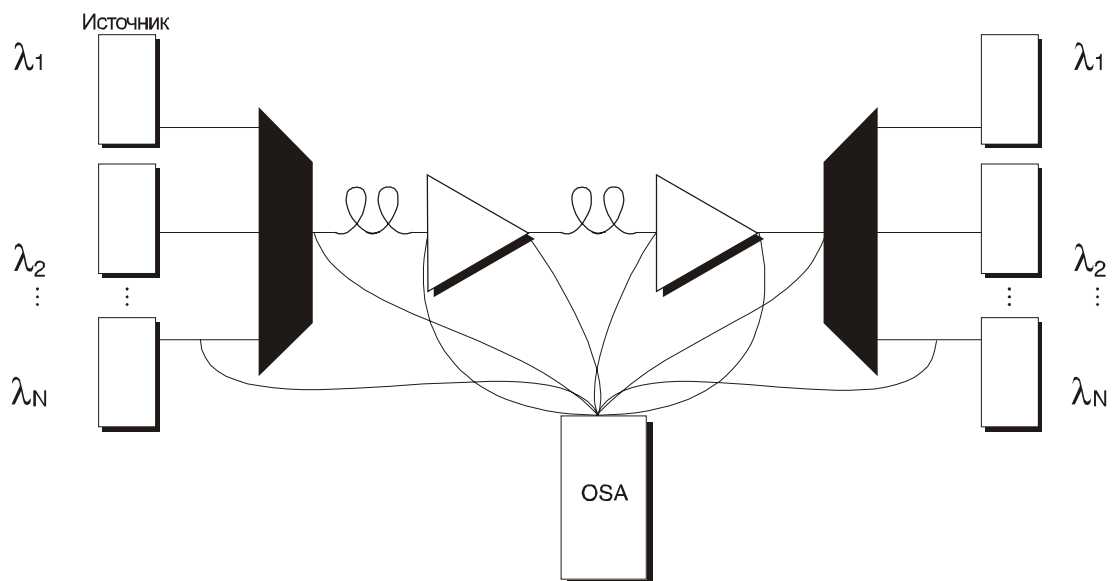


Рис. 5.21 Определение характеристик системы в различных точках линии связи с помощью анализатора оптического спектра OSA

Во-первых, с помощью анализатора OSA определяют среднее по времени значение OSNR на входе в демультиплексор. Отношение сигнал/шум измеряется во всей спектральной полосе рабочего диапазона (шаг зависит от требований производителя системы), для чего мощность сигнала в канале сравнивается с мощностью шума непосредственно рядом с каналом. Обычно приемлемым считается значение 18 дБ и больше.

Во-вторых, отношение сигнал/шум измеряют на входах и выходах всех оптических усилителей в линии. Для систем со скоростью передачи 2,5 Гбит/с эти значения должны быть не менее 21 дБ.

Представляет интерес также изучение распределения мощности сигналов передатчиков по каналам, рис. 5.22. Обычно степень неоднородности распределения составного сигнала по мощности определяют как максимальную разность между максимальными значениями мощности отдельных каналов. Ее измеряют с помощью анализатора OSA на выходе из первого оптического усилителя (на который поступает сигнал с мультиплексора). В этой точке значение OSNR должно быть достаточно большим (не менее 28 дБ для полосы 0,1 нм), а неоднородность распределения мощности между каналами не должна превышать 2 дБ.

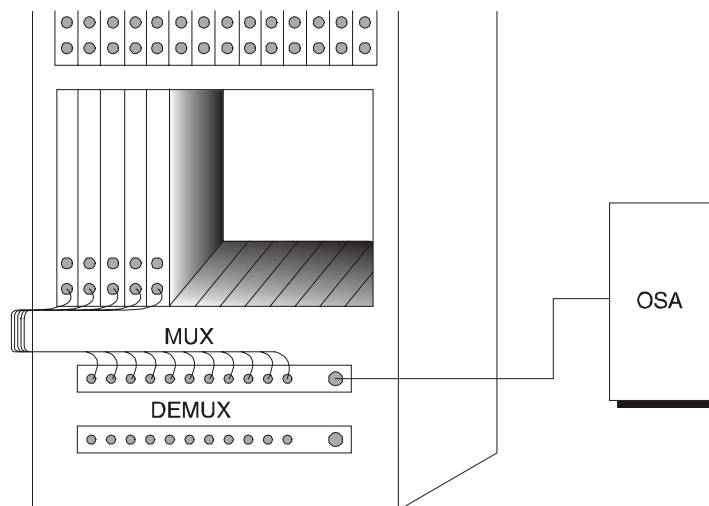


Рис. 5.22. Анализатор оптического спектра OSA – лучший прибор для измерения величины OSNR

Коэффициент ошибок BER необходимо измерять за короткий и длительный период времени. Для измерения BER за короткий период времени (15 минут) используют стандартная конфигурация линии, например, шесть каналов с расстоянием между каналами 50 ГГц и полными потерями в каждом канале 25 дБ. С помощью тестера BER необходимо убедиться, что BER для каждого канала не превышает максимально допустимого значения (10^{-12} для полных потерь 25 дБ).

Измерение BER за длительный период времени также происходит с помощью тестера BER при уровне сигнала близком к рабочему (−15 дБм). Время измерения должно составлять 24 часа, а потому на практике обычно невозможно протестировать каждый канал. Чаще всего тестируют канал с самым низким уровнем OSNR и канал с сигналом самого высокого уровня мощности.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

Для проверки устойчивости работы линии связи случайным образом убирают и вновь добавляют компоненты какого-либо канала и наблюдают за поведением составного сигнала. Изменения конфигурации одного канала никак не должны отражаться на уровне сигнала во всех остальных каналах.

Стабильность частоты (длины волны) каналов проверяется с помощью многоволнового измерителя MWM. Для систем с интервалом между каналами 50 ГГц частота каждого канала не должна отклоняться от номинальной более чем на ± 5 ГГц.

Следует также провести контрольный холодный старт системы. Для этого устанавливают тестеры BER на достаточное число каналов, выключают питание и снова включают его через определенное время. Продолжительность отключения зависит от временных постоянных источников питания и максимальных задержек в контрольных каналах, но оно должно составлять не менее 1 минуты. Необходимо определить и зафиксировать время, которое потребуется для полного восстановления всех каналов связи и функций управления. При этом не должно возникать никаких ложных сообщений о неисправностях.

Наряду с измерением BER по каналам также проводят тестирование единой системы WDM на более высоком уровне при помощи анализатора протоколов, соответствующих используемым сетевым стандартам, рис. 5.23.

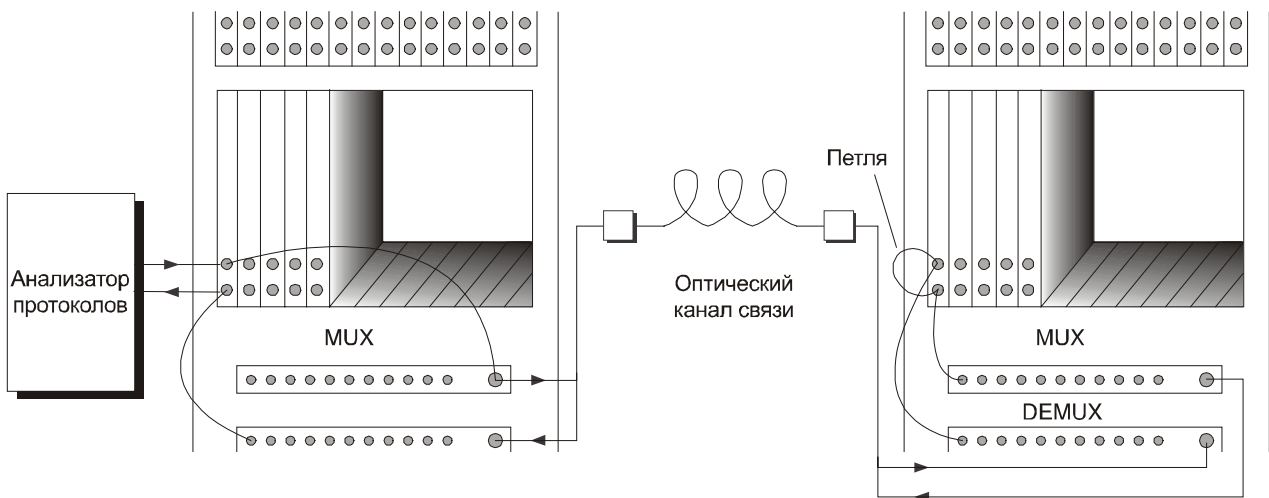


Рис. 5.23. Измерение характеристик каналов в замкнутой петле с помощью анализатора протоколов

5.3.6 Обработка сообщений о неисправностях

Большая часть элементов оптической сети – передатчики, усилители и т. д. – имеют датчики неисправностей, которые выдают сигнал неисправности при выходе определенных параметров за пределы допустимых значений. В некоторых случаях сообщения о неисправностях имеют несколько уровней, которые отражают степень важности сообщения о неисправности.

Для того чтобы протестировать работу датчиков неисправностей, преднамеренно изменяют один или несколько параметров системы – так, чтобы они вышли за пределы своих нормальных значений – и проверяют, выдают ли датчики соответствующие сообщения о неисправностях.

В лазерном передатчике постоянно контролируют уровень мощности выходного сигнала, температуру термоэлектрического теплоотвода TEC (Thermo-Electric Cooler), температуру решетки и температуру самого лазера.

Эти же параметры находятся под постоянным контролем датчиков неисправностей в модуле лазера накачки усилителя EDFA. Кроме того, сообщение о неисправности выдается при потере сигнала на входе или на выходе усилителя EDFA.

В приемнике постоянно проверяется наличие выходного электрического сигнала и температура решетки при наличии последней.

Аналогичным образом с помощью датчиков неисправностей ведется мониторинг контрольного оптического канала (постоянно измеряется уровень мощности сигнала в ключевых точках, управляющий ток, температура).

Другая группа сообщений о неисправностях – сообщения о серьезных авариях, таких как полная потеря сигнала на каком-либо участке сети. Система сигнализации должна срабатывать, если пропадает сигнал на выходе передатчика, на входе или выходе какого-либо усилителя, в любом из каналов на входе в демультиплексор или на входе приемника. Кроме этого система сигнализации должна реагировать на потерю мощности сигнала в любой точке сети.

Особый случай аварии – пропадание сигнала на входе в усилитель EDFA. В этом случае система сигнализации должна не только выдать соответствующее сообщение о неисправности, но и через определенный период времени (определенный техническими характеристиками усилителя) отключить лазеры накачки.

5.4 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

Системы DWDM получили широкое распространение только в середине 90-х годов, и пока еще не определены четкие стандарты для их технического обслуживания. По всей видимости, одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации систем WDM, является повышение коэффициента ошибок и искажение сигналов в отдельных каналах, рис. 5.24. Значение BER может увеличиваться из-за смещения длины волны излучения DFB-лазера, изменения коэффициента усиления в зависимости от длины волны усилителей EDFA, возрастания уровня шумов в усилителях EDFA или неожиданного изменения спектральных передаточных характеристик некоторых других компонентов. В худшем случае сигнал в отдельном канале может быть полностью потерян. Независимо от уровня деградации сигнала, администратор сети и обслуживающий персонал должен располагать методиками тестирования и соответствующим измерительным оборудованием для быстрого и точного определения неисправных элементов системы.

Все характеристики, которые мы рассматривали при описании этапов монтажа сети и ввода ее в эксплуатацию, в той или иной степени значимы и в процессе ее эксплуатации. Однако часть этих характеристик непосредственно связана с работоспособностью сети, и их желательно проверять как можно чаще.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

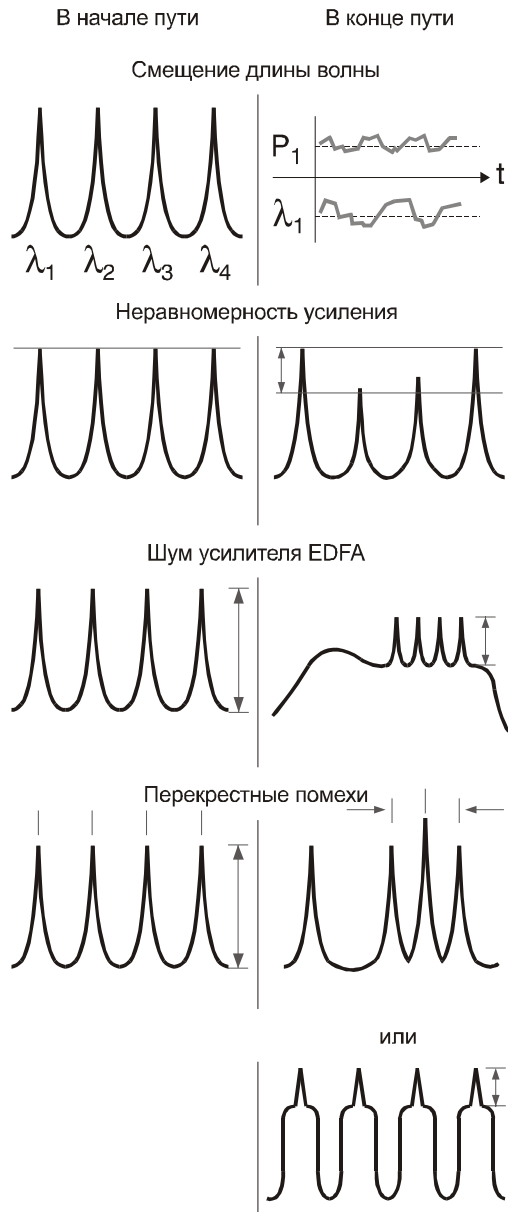


Рис. 5.24 Искажение сигналов, которое может возникнуть при передаче

5.4.1 Отношение сигнал/шум OSNR

Снижение качества передачи в большинстве случаев сопровождается падением наблюдаемого отношения сигнал/шум OSNR. Измерение этого параметра для каждого канала, несомненно, одна из наиболее важных процедур при техническом обслуживании и устранении неисправностей. Определить OSNR достаточно просто с помощью анализатора OSA. Величина OSNR – это отношение (или разница, если значения выражены в дБм) уровня пиковой мощности сигнала в канале к уровню мощности шумов в пределах полосы канала. Большая часть измерительного оборудования при тестировании автоматически выдает значение отношения сигнал/шум.

5.4.2 Потери

Потери в системах WDM необходимо измерять для каждого канала. Лучше всего для этой цели подходит анализатор OSA. Возможно, для его спектральной калибровки и контроля понадобится также мнововолновой измеритель MWM.

Стандартные методы определения оптических потерь на отражение уже обсуждались выше. Мощность сигнала, отраженного линией, измеряется с помощью источника излучения,

разветвителя и фотодетектора; при этом во время тестирования линия не должна использоваться для передачи сигнала. В качестве детектора может также использоваться анализатор OSA, который позволяет получить зависимость уровня потерь на отражение от длины волны. В полевых условиях результаты достаточной точности можно получить с помощью портативного измерителя обратных потерь. На уровне системы в целом все эти измерения выполняет система дистанционного тестирования волокон RFTS.

5.4.3 Поляризационная модовая дисперсия

Из трех методов измерения поляризационной модовой дисперсии PMD - на основе анализа собственных значений матрицы Джонса, сканирования длин волн и интерферометрии – только последний метод подходит для применения в полевых условиях. Этот метод обладает высокой точностью, не требует проведения одновременных измерений на обоих концах линии связи и позволяет измерять большие значения PMD на протяженных участках линии связи.

5.4.4 Хроматическая дисперсия

Существует несколько методов для измерения хроматической дисперсии, все они требуют применения специализированного оборудования и аккуратной обработки результатов измерений. Постоянный контроль этого параметра в процессе эксплуатации вряд ли возможен. Влияние хроматической дисперсии на системы DWDM за длительный период времени пока недостаточно изучено, и требуется значительное совершенствование полевого измерительного оборудования для ее мониторинга в проложенных волокнах.

Такие параметры, как чувствительность приемника, диапазон мощностей входного сигнала, деградация сигнала и пороги потерь сигнала измеряются с помощью программируемого перестраиваемого оптического аттенюатора и тестера BER.

5.4.5 Оптическое усиление

Оптический усилитель (в системах DWDM это почти всегда EDFA) – важнейший элемент любой волоконно-оптической линии связи. Обслуживающий персонал должен иметь возможность контролировать характеристики оптического усилителя в полевых условиях.

Коэффициент усиления и его распределение по каналам измеряются с помощью анализатора OSA, желательно с возможностью запоминания результатов измерений. Для каждого канала измеряется мощность сигнала на входе и на выходе усилителя EDFA, и полученные значения сравниваются, что дает коэффициент усиления и его распределение по каналам. Обычно одновременно с этим измеряется и уровень шумов OSNR в каждом канале. Полная мощность может быть определена как сумма мощностей отдельных каналов или самостоятельно измерена с помощью измерителя мощности.

5.4.6 Длина волны

Для точного измерения центральной длины волны применяют многоволновые измерители MWM, построенные на основе интерференционных методов. При полевых измерениях абсолютной длины волны в системах DWDM погрешность не должна превышать значения 0,005 нм. Так как сигналы могут быть слабыми многоволновой измеритель MWM должен иметь широкий динамический диапазон (30-40 дБ). Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, наряду с многоволновым измерителем MWM может также потребоваться анализатор OSA.

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

С помощью многоволнового измерителя MWM также выявляют смещения длины волны и уровня мощности сигналов в отдельных каналах в зависимости от времени.

5.4.7 Перекрестные помехи

Измерение уровня перекрестных помех в полевых условиях проводить достаточно просто, так как у современных анализаторов OSA имеется возможность запоминания результатов измерений. С помощью оптического коммутатора можно последовательно протестировать все каналы, не подключаясь заново после каждого измерения. Мощность сигнала в каждом канале запоминается, и после проведения измерений для всех каналов вычисляется значение перекрестных помех.

5.5 МОНИТОРИНГ СИСТЕМЫ WDM

Мониторинг системы WDM – это непрерывный контроль состояния активных каналов при помощи соответствующего набора тестов. Мониторинг ведется как для того, чтобы выявлять любые отклонения в оптических характеристиках сети, которые могут повлиять на ее работоспособность, так и для сбора статистической информации. Мониторинг включает в себя широкий спектр действий, начиная от планирования последовательности тестов и управления их проведением и заканчивая анализом полученных данных.

Мониторинг особенно важен для систем DWDM, которые очень чувствительны к таким оптическим явлениям, как дисперсия, перекрестные помехи, смещение центральной длины волны и т.д. Для оперативного выявления отклонений важнейших характеристик от заданных, необходимо непрерывно их контролировать. Хорошая система мониторинга активных волокон постоянно выдает как текущие значения основных характеристик, так и статистическую информацию о состоянии системы.

5.5.1 Контрольный оптический канал

Мониторинг активных волокон – не единственный способ контроля состояния системы. Для этой цели можно также использовать специально выделенный контрольный оптический канал OSC (Optical Supervisory Channel). С помощью канала OSC ведется постоянное наблюдение за работой системы и эффективностью передачи данных, выявляются различные неполадки, потери мощности и другие нарушения целостности сигнала. Канал OSC позволяет проводить все необходимые тесты непрерывно, а не по расписанию, и без отключения каналов. Чтобы гарантировать целостность канала OSC, по которому могут передаваться сигналы управления, длину волны для него обычно выбирают вне рабочего диапазона усилителей EDFA.

При мониторинге с использованием канала OSC нет непрерывного потока сообщений и статистических данных: если система работает нормально, это и не нужно. Канал OSC используется не для того, чтобы выполнять тестирование отдельных компонентов. Это средство постоянного наблюдения за состоянием сети в целом. Использование канала OSC помогает системному контроллеру поддерживать постоянную мощность оптического сигнала и качество передачи, максимально эффективно использовать ресурсы сети. Если тестирование с помощью канала OSC выявляет отклонения в целостности сигнала, администратору сети выдается соответствующее сообщение.

В отношении канала OSC пока не существует каких-либо стандартов; на практике применяются несколько возможных подходов. В настоящее время канал OSC обычно имеет длину волны 1510 нм или 1625 нм, так как эти длины волн лежат вне рабочего диапазона усилителей EDFA и при этом достаточно близко к нему, чтобы их можно было использовать для мониторинга. Поскольку компоненты для использования на длине волны 1510 нм пока не являются широко доступными, рассматривается возможность выделения под канал OSC и других длин волн – 1480 нм или 1310 нм (в зависимости от производителя).

Для тестирования с помощью канала OSC не требуется какого-то специального тестового оборудования – используется только то оборудование, которое необходимо для измерения выбранных характеристик. Для мониторинга потерь в соединителях и местах сварки волокон можно использовать измеритель мощности, а лучше – оптический рефлектометр OTDR. С помощью рефлектометра OTDR можно обнаруживать некоторые проблемы в оптическом волокне до их проявления. Определенные дефекты натяжения волокна легче обнаружить на длине волны канала OSC, а не в рабочем диапазоне усилителя EDFA. Мониторинг энергетического потенциала системы связи ведут с помощью перестраиваемого аттенюатора и тестера оптических потерь.

Другой подход заключается в применении для мониторинга состояния системы одного из каналов системы DWDM. В отличие от метода с использованием канала OSC, этот метод чувствителен к неисправностям усилителя EDFA. Однако он соответствует стандартам SONET/SDH и может использоваться для обнаружения ошибок маршрутизации и передачи.

Одно из решений проблемы чувствительности к выходу из строя усилителя EDFA заключается в том, чтобы параллельно вести мониторинг спектральных характеристик еще одного или нескольких каналов. Добавление спектрального измерительного оборудования в блок дистанционного тестирования RTU (Remote Test Unit) системы дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System) позволяет в полном объеме вести мониторинг системы передачи.

5.5.2 Система дистанционного тестирования волокон RFTS

Для мониторинга сетей связи используется разнообразное тестовое и измерительное оборудование. В первую очередь, это многоволновые измерители MWM и анализаторы оптического спектра OSA. Часто требуются также анализаторы PMD, оптические рефлектометры OTDR и измерители мощности потерь на отражение.

Система RFTS объединяет практически все возможности отдельных измерительных приборов. Система RFTS позволяет экономично и эффективно контролировать состояние сети и проводить ее техническое обслуживание. Возможно, на настоящий момент это лучшее решение для полного мониторинга сети, рис. 5.25.

Система мониторинга RFTS постоянно и автоматически ведет контроль характеристик волокон в сети связи, оперативно обнаруживает их неисправности и определяет их местоположение. Это позволяет:

- Непрерывно контролировать качество обслуживания (важное стратегическое преимущество для поставщика услуг связи).

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

- Увеличить экономическую эффективность сети связи (за счет полного использования всех преимуществ систем DWDM (STM-16 и STM-64) и постоянного поддержания высокой работоспособности).
- Уменьшить нагрузку на технический персонал и увеличить эффективность его работы.

В обычных волоконно-оптических сетях связи, не использующих технологию DWDM, системы RFTS пока редко используются для обнаружения неполадок в передаче данных. Эту функцию берет на себя система контроля, встроенная в сетевое оборудование (например оборудование SDH). Система контроля достаточно быстро реагирует на отказы связи (менее чем за 120 мс), после чего для восстановления связи используются методы резервирования линий и каналов на основе соответствующей сетевой топологии и протоколов.

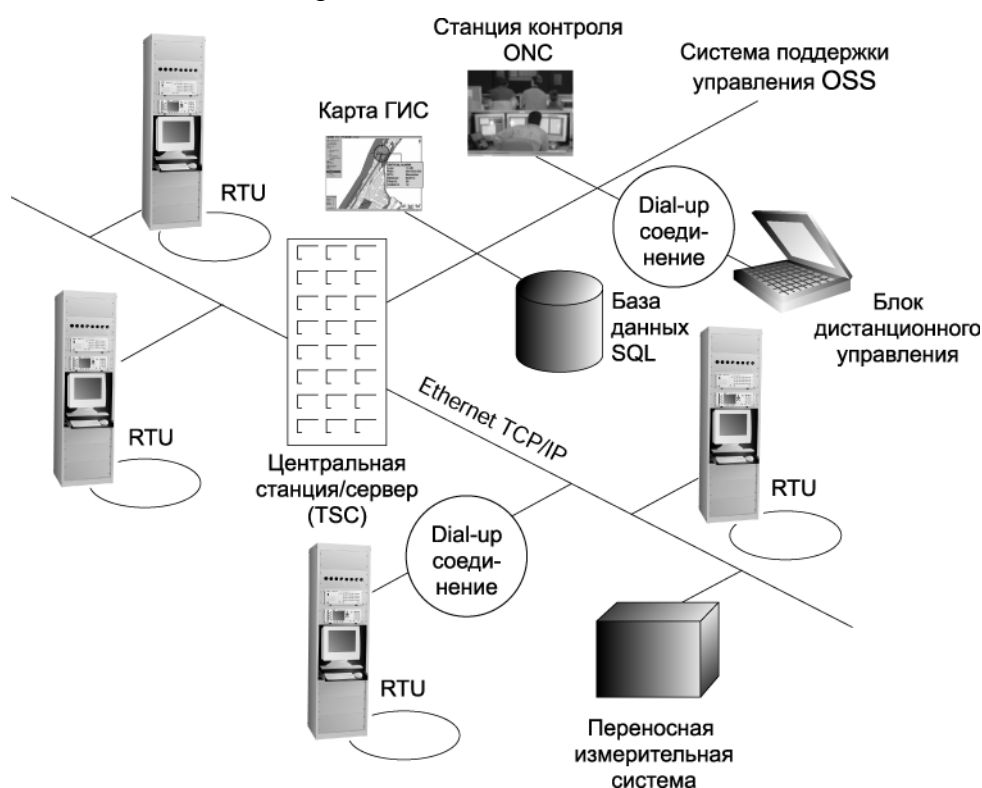


Рис. 5.25 Типичная схема системы RFTS

В сетях связи DWDM для восстановления связи недостаточно принятия мер на протокольном уровне. При использовании технологии DWDM в иерархии сети появляется новый уровень – оптический спектр. Обеспечить защиту каналов WDM на физическом уровне невозможно, а потому операторам сетей связи на основе систем DWDM необходимо вести наблюдение за спектром составного сигнала.

В системе RFTS реализовано несколько различных методов мониторинга систем передачи, что вносит совершенно новое измерение в мониторинг состояния волокна.

Спектральный мониторинг при возникновении неисправностей

При обнаружении оптическим рефлектометром OTDR неисправного волокна в линии связи, с помощью анализатора OSA определяют неисправный канал в системе DWDM. После этого оперативно устанавливается наиболее вероятная причина неисправности – уменьшение уровня OSNR, падение пиковой мощности или смещение длины волны канала – и предпринимаются соответствующие корректирующие действия. Даже в том случае, когда сигнал в канале потерян полностью, исследование остальных каналов системы DWDM с помощью анализатора оптического спектра OSA позволяет получить важную информацию и предотвратить проблемы, которые могут возникнуть из-за автоматического перераспределения усиления в EDFA.

Спектральный мониторинг при профилактическом обслуживании

Профилактическое обслуживание систем передачи DWDM с помощью систем спектрального мониторинга дает также определенные преимущества. Хотя DFB-лазеры имеют высокую кратковременную стабильность, за период времени средней длительности (более года) в первую очередь именно они определяют работоспособность сети связи. С учетом очень узкой спектральной ширины каналов (0,1-0,2 нм) в современных системах DWDM достаточно сложно поддерживать необходимую спектральную стабильность передатчиков на протяжении всего времени эксплуатации. Сдвиг длины волны излучения даже на 0,02 нм может привести к полной потере сигнала в канале. Точность измерения длины волны с помощью многоволнового измерителя MWM системы RFTS составляет около 0,003 нм, что вполне достаточно для измерения сдвига длины волны DFB-лазеров за длительный период времени и выявления потенциальных проблем.

Мониторинг PMD для оценки пригодности линии связи для передачи на уровне STM-64

Поляризационная модовая дисперсия также является одним из основных ограничивающих факторов пропускной способности линии связи. Из-за вероятностной природы PMD необходимо постоянно наблюдать за ее поведением в линиях связи уровня STM-64. Анализаторы PMD используются при выборочных проверках за длительный период времени. Система RFTS обладает всеми необходимыми возможностями для тестирования PMD. Она позволяет осуществлять мониторинг среднего значения PMD в линии связи, а также вести мониторинг вариаций дифференциальной групповой задержки DGD в зависимости от длины волны. Вторым методом позволяет с большой точностью определить максимальное и минимальное значение DGD для каждого канала.

Сегодня в волоконно-оптической промышленности наблюдается огромный интерес к мониторингу сетей связи с целью выявления возможных неполадок и предотвращения серьезных аварий. Современный подход заключается в том, что все необходимое для тестирования оборудование объединяется в единую универсальную систему RFTS. Система RFTS является тем решением, которое максимально соответствует общему стремлению к построению высоко эффективных и надежных сетей связи.

5.5.3 Мониторинг и устранение неисправностей на практическом примере

Операторы сетей связи должны практически постоянно следить за качеством передачи по волокну. Целью тестирования системы является демонстрация работоспособности системы и целостности передачи данных. Перед тем, как тестировать отдельные компоненты системы, исследуют оптические характеристики сигнала на конце линии связи. В случае выявления проблем проводят специальные измерения. На рис. 5.26 показан пример оптимальной последовательности тестов при устранении неисправности.

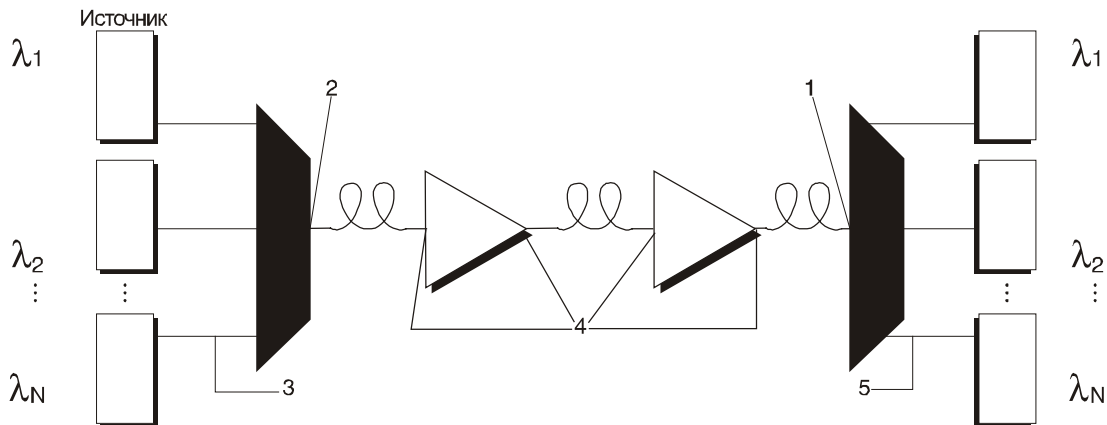


Рис. 5.26 Последовательность тестирования системы при устранении неисправности

1. В первую очередь необходимо провести тестирование демультиплексора на конце линии связи. Это позволяет определить, требуются ли еще какие-либо дополнительные тесты. С помощью многоволнового измерителя MWM измеряют значение OSNR и точность длины волны каждого канала, рис. 5.27. Для приемлемого значения BER (например, 10⁻¹³) значение отношения сигнал/шум OSNR на конце линии связи должно быть не менее 18 дБ (типичные значения OSNR составляют 22 дБ и меньше). В зависимости от системы и типа фотодетектора, мощность сигнала в канале должна составлять около -8 дБм. Длина волны канала должна соответствовать номинальному значению с точностью несколько десятков пм (для проведения измерений с такой точностью нужен многоволновой измеритель MWM).

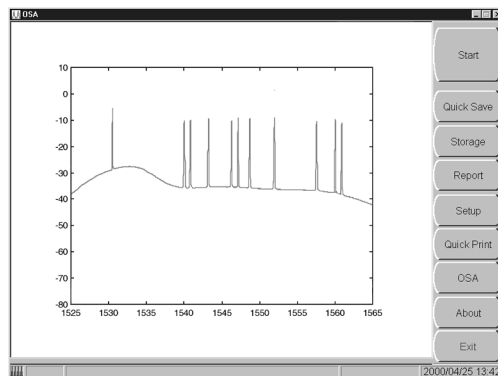


Рис. 5.27 Измерение OSNR на конце линии связи

2. Если на первом этапе измерений обнаружены проблемы в линии связи, следует измерить уровень мощности сигнала на выходе из мультиплексора, рис. 5.28. Его номинальное значение может составлять от -5 до 2 дБм в зависимости от требований оператора связи. Если измеренное значение отличается от номинального, необходимо измерить потери в мультиплексоре.

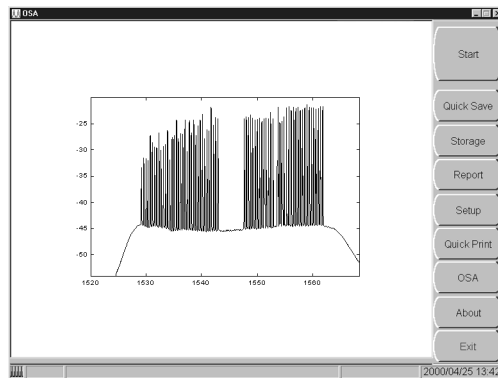


Рис. 5.28. Высокое значение OSNR на начальном участке линии связи

3. После того, как на основе результатов предыдущих измерений определен неисправный канал (каналы), следует проверить мощность сигнала и центральную длину волны соответствующего лазерного передатчика, рис. 5.29.

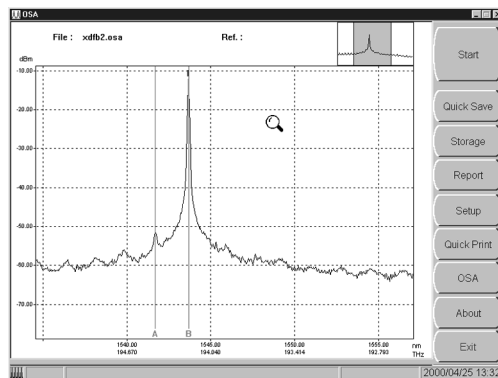


Рис. 5.29. Типичный спектр DFB-лазера в системе WDM

МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ WDM

4. На следующем этапе проверяют усилители EDFA. Их коэффициент усиления должен быть линейным и одинаковым для всех каналов. Разброс коэффициента усиления более чем на 3 дБ недопустим, рис. 5.30

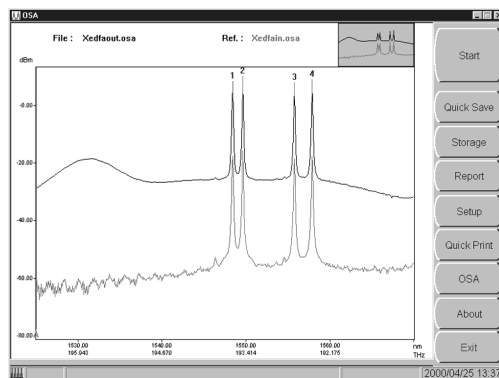


Рис. 5.30. Спектральная зависимость коэффициента усиления EDFA (приведены входной и выходной сигналы)

5. При тестировании цифровых систем (SDH, SONET, IP и др.) необходимо проверить качество передачи. Для приемлемого уровня BER мощность принимаемого сигнала должна быть не менее -20 дБм. Это измерение уже не относится к оптическим: для его проведения требуется электронное оборудование.

После проверки всех параметров и выполнения всех процедур, описанных в этой главе, системный интегратор готов сдать новую систему DWDM в эксплуатацию. Конечно, заказчик также обязательно проверит работу системы с помощью своих процедур контроля качества. Набор требований, которые заказчик предъявляет к сети, зависит как от преобладающих в волоконно-оптической промышленности в данный момент тенденций, так и от рекомендаций организаций по стандартизации. Следующая глава будет посвящена вопросам стандартизации и влиянию стандартов на требования, которые заказчик предъявляет к системе.

РУКОВОДСТВО DWDM

ГЛАВА 6

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

6.1 ЗАЧЕМ НУЖНЫ СТАНДАРТЫ?

Возникновение стандартов – верный признак того, что технология стремительно развивается и получает широкое распространение. Хорошо разработанные, регулярно обновляемые стандарты обеспечивают защиту пользователя при проектировании сетей связи от применения устройств и параметров, которые могут устареть в ближайшем будущем. Стандарты служат основой для проведения новых исследований и разработок. Стандарты постоянно развиваются, но каждое их поколение является стабильной средой для создания оборудования и систем с оптимальным на данный момент сочетанием эксплуатационных качеств и характеристик.

Соответствие стандартам обеспечивает возможность для систем связи различных провайдеров, применяющих даже непохожее оборудование и предоставляющих разные услуги, относительно легко взаимодействовать друг с другом. При отсутствии стандартов было бы достаточно сложно или вовсе невозможно обеспечить согласование интерфейсов между такими системами; при недостаточно оптимальных стандартах для этого пришлось бы пожертвовать производительностью систем. Наличие соответствующих стандартов обеспечивает возможность создания объединенных сетей многих владельцев и оборудованием различных производителей, которые могут работать с максимальной эффективностью.

От наличия стандартов выигрывают как провайдеры услуг, которые могут использовать оборудование различных производителей, что стимулирует здоровую конкуренцию, так и производители оборудования, которые получают основу для больших объемов производства и, соответственно, снижения цен.

Хороший пример влияния стандартов – успех стандарта синхронных оптических сетей SONET (Synchronous Optical Network) в Северной Америке и стандарта синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) в Европе и Азии. Широкое распространение этих стандартов позволяет сегодня непосредственно соединять сети связи, в которых используется оборудование различных производителей. К стандартам SONET и SDH постепенно перешли практически все создатели волоконно-оптических сетей во всем мире.

6.2 КАК УСТАНАВЛИВАЮТСЯ СТАНДАРТЫ?

Международные стандарты в телекоммуникациях устанавливаются в основном двумя организациями. Это Международный телекоммуникационный союз ИТУ (International Telecommunication Union), который определяет стандарты на применение технологий и оборудования, и Международная электротехническая комиссия ИЕС (International Electrotechnical Commission), которая устанавливает стандарты для оборудования. Обе эти организации имеют штаб-квартиры в Женеве. Они тесно сотрудничают с основными национальными и региональными агентствами по стандартизации, такими как Ассоциация телекоммуникационной промышленности TIA (Telecommunications Industry Association) в США, Европейский институт по телекоммуникационным стандартам ETSI (European Telecommunication Standard Institute) в Европе и ТТС в Японии и некоторые другие (см. табл. 6.1).

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

Табл. 6.1 Организации, занимающиеся разработкой стандартов

| Применение технологий и оборудования | Оборудование | Уровень |
|--------------------------------------|--------------|------------------|
| ITU | IEC | Международный |
| ETSI | CENELEC | Европа |
| TTC | JISC | Япония |
| EIA/TIA | | Северная Америка |

Принятие решений в этих международных организациях происходит путем голосования. Голоса, выделенные каждой стране, распределяются между представителями государства и телекоммуникационной промышленности.

Процесс принятия решений основан на обсуждении предварительных предложений до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворяющий всех подход. Инерционность этого процесса приводит к тому, что стандарты обычно на несколько лет отстают от технологий. Однако в этом есть и определенные плюсы, поскольку после опубликования стандарты начинают применяться сразу и безоговорочно, без долгих последовательных приближений.

6.3 ОРГАНИЗАЦИИ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

Стремительное развитие технологии DWDM и возрастающая необходимость использовать ее преимущества на практике привели к тому, что множество национальных и международных организаций стали заниматься разработкой необходимых стандартов.

В США стандартизацией для ряда областей промышленности, в том числе и для волоконно-оптических телекоммуникаций, занимаются организация TIA (Telcordia Technologies (ранее Bellcore)) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). На международном уровне стандарты в форме рекомендаций устанавливаются двумя основными организациями: IEC и ITU. Обе эти организации имеют штаб-квартиры в Женеве (Швейцария).

6.3.1 Международный телекоммуникационный союз ITU

Международный телекоммуникационный союз ITU – это многопрофильный союз при ООН, объединяющий частный и государственный секторы для координации деятельности в области глобальных сетей связи. В основном ITU занимается стандартами на применение технологий и оборудования. В ITU есть отделы радиосвязи ITU-R, стандартизации телекоммуникаций ITU-T и развития телекоммуникаций ITU-D. Отдел стандартизации телекоммуникаций ITU-T в наибольшей степени связан с волоконно-оптическими сетями. В нем разрабатываются стандарты в форме рекомендаций на техническое обеспечение, организацию работы и установление тарифов в области глобальных телекоммуникаций. В отделе ITU-T работают четырнадцать исследовательских групп SG (Study Group), в каждой из которых есть представители всех стран-членов ITU. Каждые четыре года представители всех стран-членов ITU собираются на Всемирные конференции по стандартизации в области телекоммуникаций WTSC

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

(World Telecommunication Standardization Conference) и определяют основные направления деятельности этого сектора, формируют новые рабочие группы и утверждают план работ на следующие четыре года.

Стандарты ИТУ не являются обязательными, но широко поддерживаются, так как облегчают взаимодействие между сетями связи и позволяют провайдерам предоставлять услуги по всему миру.

Исследовательская группа SG 15 отдела ИТУ-Т

В отделе ИТУ-Т для работы над конкретными задачами формируются специальные группы, которые распускаются после завершения работ. Сейчас работают пятнадцать таких исследовательских групп, включая группу SG 15 (Транспортные сети, системы и оборудование), которая наиболее тесно связана с системами DWDM.

Группа SG 15 занимается разработкой международных стандартов в области транспортных сетей, систем и оборудования, включая коммутацию и процессы обработки сигналов. Например, недавно группа SG 15 начала работать в области стандартизации передачи данных по волоконно-оптическим сетям с использованием протокола IP (Internet Protocol). Одна из важнейших областей деятельности, которая привлекает к ИТУ-Т множество новых организаций – стандартизация доступа, в частности, для оптических сетей. На настоящий момент в группу SG 15 входит более 345 членов из 26 стран и 78 научных и промышленных организаций. Это одна из самых больших исследовательских групп в отделе ИТУ-Т.

В настоящее время группа SG 15 занимается выработкой 89 новых рекомендаций (в том числе исправлением старых) по таким направлениям, как:

- линии цифрового абонентского доступа (xDSL);
- обработка сигналов (эхо контроль, оборудование для соединения GSTN, сети IP);
- SDH/SONET (формат, оборудование, сетевые архитектуры, IP поверх SDH/SONET);
- оборудование ATM (в том числе оборудование для IP поверх ATM);
- оптические технологии (системы, усилители, компоненты, полностью оптические сети, IP по оптике);
- управление системами и оборудованием передачи данных (функции, услуги, информационное моделирование элементов сети, в том числе аспекты, связанные с IP).

Группа SG 15 состоит из четырех рабочих команд WP (Working Party): доступа в сеть (Network Access), обработки сигналов (Network Signal Processing), мультиплексирования (Multiplexing) и коммутации и передачи данных (Switching and Transmission). Последняя из этих команд WP 4/15, отвечает за все аспекты, связанные со стандартизацией сред и систем передачи данных, в том числе оптических волокон, систем, подсистем и компонентов.

В области волоконно-оптической связи к обязанностям рабочей команды WP 4/15 относятся:

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

- подготовка общих рекомендаций по организации волоконно-оптических сетей;
- подготовка и обновление списка направлений работы в области волоконно-оптической связи;
- координация работы в области волоконно-оптической связи внутри ITU-T;
- координация работы по технологии IP поверх WDM.

Последние рекомендации рабочей команды WP4/15 в области систем DWDM касались таких вопросов, как:

- характеристики и методы тестирования оптических волокон и кабелей;
- характеристики оптических систем для передачи данных между офисами и на большие расстояния;
- характеристики активных и пассивных оптических компонентов и подсистем;
- характеристики оптического волокна подводных кабельных систем; надежность и работоспособность оптических систем;
- характеристики волоконно-оптической связи;
- оптические интерфейсы для оборудования и систем, связанных с технологией SDH;
- обеспечение безопасности оптических сетей и требования к оптическим системам передачи данных;
- оптические интерфейсы для многоканальных систем SDH с оптическими усилителями (Рек.G.692);
- определение и методы тестирования общих параметров оптических усиливающих устройств и подсистем;
- общие характеристики оптических усиливающих устройств и подсистем.

Чтобы максимально сократить разрыв между новейшими достижениями технологии и общепринятой практикой, требуется достаточно глубоко изучить каждый из этих вопросов. Особенно важно исследовать вероятные пути развития соответствующих технологий. В отношении оптических волокон и кабелей рабочая команда WP 4/15 недавно пересмотрела рекомендованные методы тестирования, внесла в них изменения, связанные с появлением новых типов волокон, и добавила новые методы тестирования нелинейностей и неоднородностей.

Рабочая команда WP 4/15 уделяет пристальное внимание четкому определению и способам измерения таких сложных явлений, как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия. Это требуется для того, чтобы производители и пользователи могли свободно обмениваться результатами тестирования систем и компонентов.

Область, которая сейчас привлекает особый интерес из-за феноменального роста скорости доступа в Интернет – использование протокола IP (Internet Protocol) непосредственно в оптических сетях. Рабочая команда WP 4/15 разработала структурный подход, цель которого – обеспечить совместимость оборудования маршрутизации (как разрабатываемого, так и уже установленного) с технологией IP поверх WDM. Предполагается,

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

что внедрение этой технологии позволит значительно уменьшить полосу пропускания, требуемую для сети Интернет.

Важная область работы рабочей команды WP 4/15 – разработка стандартов для современных высокопроизводительных систем WDM. Рабочая команда WP 4/15 предложила сетку частот с шагом 50 ГГц, совместимую с принятой сеткой с шагом 100 ГГц, и соответствующие стандарты для систем высокой (до 128 каналов) и низкой производительности и систем с неравномерным расстоянием между каналами (с частично занятой полосой).

Рабочая команда WP 4/15 ведет разработку стандартов для систем TDM со скоростями более 10 Гбит/с, с учетом их вероятного использования в будущем в системах WDM. В частности, в настоящее время изучаются и сравниваются основные технологии TDM со скоростью передачи 40 Гбит/с.

Важно также отметить, что в настоящее время рабочая команда WP 4/15 проводит исследования по использованию области спектра 1620-1660 нм для мониторинга сети связи, в том числе системами RFTS (см. раздел 5.5.2).

6.3.2 Международная электротехническая комиссия ИЕС

В отличие от Международного телекоммуникационного союза ИТУ, который разрабатывает стандарты на применение технологий и оборудования (стандартизирует протоколы, четко определяет и описывает характеристики различных явлений в линии связи, стандартизирует способы распределения каналов и т.д.), Международная электротехническая комиссия ИЕС разрабатывает стандарты для оборудования. Деятельность ИЕС не ограничивается телекоммуникациями и включает также такие области, как электроника, магнетизм и электромагнетизм, электроакустика, выработка и распределение энергии.

Около 50 стран являются полноправными членами ИЕС. Все они имеют равные права при голосовании и представлены Национальными комитетами (National Committees). Каждый Национальный комитет представляет интересы своей страны в области электротехники и включает как представителей государства, так и представителей частных компаний. Совместная работа Национальных комитетов направлена на достижение согласия в области стандартов на международном уровне. Страны-кандидаты в члены ИЕС имеют статус наблюдателей и не могут принимать участия в голосовании. Устанавливая международные стандарты и подготавливая технические доклады, ИЕС обеспечивает национальным агентствам по стандартизации твердую основу для разработки регулирующих стандартов. Следование стандартам ИЕС является добровольным, даже для стран-членов ИЕС.

Международная электротехническая комиссия ИЕС имеет официальные связи с другими международными организациями в области стандартизации, включая Международную организацию по стандартизации ISO (International Organization for Standardization) ИТУ, Организацию по международной торговле WTO (World Trade Organization), Европейский комитет по стандартизации в области электротехники CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). В сфере телекоммуникаций многие наиболее активные члены ТИА являются также членами ИЕС.

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

Организационная структура ИЕС включает управляющий комитет (IEC Council), различные административные единицы, около 200 технических комитетов TC (Technical Committee) и подкомитетов SC (SubCommittee) и более 700 рабочих групп WG (Work Group). Более 10 000 экспертов со всего мира подготавливают технические документы, необходимые для разработки международных стандартов. Участвовать в разработке стандартов может любая страна-член ИЕС и любая организация, которая имеет официальные связи с ИЕС.

Деятельность технических комитетов TC охватывает множество областей, от домашнего электронного медицинского оборудования до сверхпроводимости. Технический комитет TC 86 по волоконной оптике ведет работу в области систем и компонентов волоконно-оптической связи, а также методов тестирования и измерений. Структура технического комитета TC 86 отражена в табл. 6.2.

Табл. 6.2 Структура технического комитета ИЕС TC 86 Волоконная оптика

| Структура технического комитета ИЕС № 86: волоконная оптика |
|--|
| Официальные связи |
| Отдел стандартизации телекоммуникаций ITU (ITU-T) Подкомитет ИЕС №100 D (кабельные распределительные системы) |
| Рабочие группы (WG) |
| WG 1: терминология и обозначения |
| WG 4: калибровка волоконно-оптического тестового оборудования |
| WG7: отдельные/интегрированные оптоэлектронные полупроводниковые приборы для волоконно-оптической связи (включая гибридные модули) |
| Подкомитеты (SC) |
| SC 86 A: волокна и кабели WG 1: волокна WG 3: кабели |
| SC 86 B: волоконно-оптические соединительные устройства и пассивные компоненты WG 4: методы тестирования WG 6: технические требования к соединительным устройствам WG 7: технические требования к компонентам |
| SC 86 C: волоконно-оптические системы и активные устройства WG 1: системы WG 2: активные устройства WG 3: оптические усилители |

Интересы тех, кто разрабатывает стандарты для оборудования, в целом совпадают с интересами тех, кто разрабатывает стандарты на применение технологий и оборудования. Поэтому неудивительно, что области деятельности технического комитета TC 86 ИЕС и ITU во многом пересекаются. В частности, и технический комитет TC 86 ИЕС, и

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

ITU работают над такими направлениями, как поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion), WDM, оптические усилители, технические требования к волокну.

Работа ITU по выбору эталонного метода измерения PMD на практическом уровне представлена разработкой техническим комитетом TC 86 соответствующих стандартов. Например, технический комитет TC 86 подготовил технический доклад IEC 61282-3 по вычислению PMD в волоконно-оптических системах. Среди опубликованных стандартов – “Методы измерения PMD для одномодовых оптических волокон” (IEC 61941), в котором рассмотрены все коммерчески доступные методы измерения PMD для одномодового оптического волокна. В настоящее время рассматриваются предложения по разработке спецификаций на кабель со статистической поляризационной модовой дисперсией и методов измерения PMD для оптических усилителей и других оптических компонентов.

В настоящее время также ведется работа по таким направлениям, как компенсация PMD в волокне, PMD в цифровых и аналоговых системах, расчет влияния PMD на характеристики цифрового сигнала.

Недавно сформирован совет сектора SB 4 (Sector Board), деятельность которого направлена на исследование инфраструктуры сетей, связанных с системами WDM. В частности, совет сектора SB 4 работает по таким направлениям, как:

- стандартизация условий монтажа и инструкций по монтажу;
- методы DWDM для оптических усилителей и волокон;
- методы технологии xDSL для существующих и новых пассивных инфраструктур;
- основные изменения в типах волокон и их влияние на стандарты;
- применение витой пары вне помещений, оптимизированное для технологии ADSL;
- новые разработки в области кабельных систем помещений для мультимедиа.

Одной из изучаемых проблем является затухание (вносимые потери) в устройствах DWDM. Документ IEC 61074 подкомитета IEC SC 86B определяет терминологию в этой области. Этот же комитет работает вместе с ITU-T по строгому определению центральной длины волны излучения.

Общие технические требования к оптическим усилителям представлены в документе IEC 61291-1. Спецификация на многоканальные оптические усилители (документ IEC 61291-4) находится в стадии рассмотрения. В разработке спецификаций по этим и другим продуктам применяется принцип «черного ящика»: они максимально освобождены от деталей, связанных с конкретными применениями оборудования.

В документе IEC 61291-4 рассматривается автоматический контроль усиления и соответствующий рабочий диапазон мощности входного сигнала, стабилизация усиления, критерии фиксации и спектрального провала по длине волны. В IEC 61291-4 представлены общие технические требования и образцы спецификаций для цифровых, аналоговых, многоканальных оптических усилителей в зависимости от конкретного применения (усилитель мощности, предусилитель, линейный усилитель и т.д.).

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

К наиболее важным характеристикам оптических усилителей относятся:

1. Коэффициент усиления (IEC 61290-1):
 - a) Коэффициент усиления для слабого сигнала в прямом и обратном направлении;
 - b) Максимальное значение коэффициента усиления для слабого сигнала (абсолютное значение, спектральный профиль и неоднородность в зависимости от температуры);
 - c) Колебания коэффициента усиления и рабочего диапазона для слабого сигнала;
 - d) Стабильность коэффициента усиления для слабого сигнала;
 - e) Колебания коэффициента усиления, зависящие от поляризации.
2. Измерение оптической мощности (IEC 61290-2):
 - a) Номинальная мощность выходного сигнала;
 - b) Стабильность выходного сигнала высокой мощности;
 - c) Мощность выходного сигнала в режиме насыщения;
 - d) Максимальная мощность входного и выходного сигналов;
 - e) Диапазон мощности входного и выходного сигналов;
 - f) Общая максимальная выходная мощность.

Различные ограничения на технические характеристики оптических усилителей включают:

1. Общий коэффициент шума (в дБ) или его линейное значение (на единицу длины) – один из наиболее важных факторов, ограничивающих характеристики усилителей EDFA; измеряется в соответствии с IEC 61290-3-1 (с помощью OSA и метода интерполяций) или в соответствии с IEC 61290-3-2 (с помощью ESA и метода вычитаний относительной интенсивности шума RIN (Relative Intensity Noise)) или в соответствии с IEC 61290-10-2 (импульсным методом с помощью выделенного OSA).
2. Наклон спектральной зависимости коэффициента усиления, из-за чего входные сигналы с одной стороны рабочего диапазона усиливаются сильнее, чем с другой. Его измеряют в соответствии с IEC 61290-4-1 (с применением широкополосного источника излучения).
3. Обратные потери, которые могут нарушать работу соседних усилителей EDFA. Их измеряют в соответствии с IEC 61290-5-1 (с применением OSA), или в соответствии с IEC 61290-5-2 (с применением ESA), или в соответствии с IEC 61290-5-3 (с помощью метода допустимых отклонений и применением генератора отражений).
4. Утечка энергии накачки на входе и выходе, которая может приводить к появлению сигналов интерференции. Их измеряют в соответствии с IEC 61290-6-1 (методом тестирования оптического демультиплексирования).

5. Вносимые потери вне диапазона в прямом и обратном направлениях, которые ограничивают возможную общую мощность. Соответствующий тест дан в IEC 61290-7-1 (метод тестирования измерителем мощности с помощью полосового фильтра).

Рабочие группы в IEC SC 86C занимаются разработкой тестов для определения отражательной способности, надежности, коэффициентов шума и усиления, а также разработкой соответствующих спецификаций. Так, например, в документе IEC 61290-1-3 по определению коэффициента усиления методом измерения мощности оптического сигнала показано, что измерение коэффициента усиления для отдельного канала с помощью ваттметра и полосового фильтра не менее надежно, чем с помощью OSA. Это исключительно экономичный подход для проведения измерений коэффициента усиления в условиях производства, учитывая к тому же, что полученные значения можно периодически проверять с помощью OSA.

В настоящее время ведется пересмотр и совершенствование определения характеристик волокна, в том числе модернизация стандартных методов его тестирования. В документах серии IEC 60793-1-х предложены спецификации характеристик волокна на основе его свойств и предлагаются соответствующим образом измененные методы его тестирования.

6.3.3 Ассоциация телекоммуникационной промышленности TIA

В Северной Америке стандартизацией и сертификацией во всех областях телекоммуникаций занимается Ассоциация телекоммуникационной промышленности TIA (Telecommunications Industry Association). В ассоциации TIA есть два комитета, связанных с волоконной оптикой: FO-2.0 (Системы оптической связи), разрабатывающий стандарты для систем и для применения технологий и оборудования, и FO-6.0 (Волоконная оптика), разрабатывающий стандарты для оборудования. В каждый из этих комитетов входят несколько активных подкомитетов и рабочих групп, из которых наиболее тесное отношение к системам WDM имеют: FO-2.1.1 (Системы, подсистемы и устройства с оптическим усилением), FO-2.1.2 (Рабочая группа по разработке систем передачи по одномодовому волокну), FO-6.3.5 (Пассивные волоконно-оптические устройства разветвления) и FO-6.6.5 (Одномодовые волокна). Ассоциация TIA – независимая организация при Американском национальном институте стандартов ANSI (American National Standards Institute). Ее членами являются представители государств и частных компаний.

Многие члены ассоциации TIA являются также членами ITU и IEC, с которыми TIA поддерживает прямые официальные связи.

Группа FO-2.1.1 недавно стала работать над такими направлениями, связанными с оптическими усилителями, как точное определение и измерение коэффициента шума, циклическое тестирование, ошибки относительной интенсивности шумов.

Группа FO-2.1.2 предложила стандартную процедуру тестирования оптического волокна по измерению оптического отношения сигнал/шум с применением OSA на основе интерферометра Майкельсона, дифракционной решетки и/или интерферометра Фабри-Перо (OFSTP-6, Optical Fiber Standard Test Procedure). Спектральная разрешающая способность такого OSA позволяет выполнять измерения мощности сигнала с погреш-

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМ DWDM

ностью менее 0,1 дБ. Например, для канала со скоростью 10 Гбит/с необходимая ширина полосы составляет $\geq 0,2$ нм, а для каналов со скоростью 2,5 Гбит/с и меньше - $\geq 0,09$ нм.

Группа FO-6.3.5 занимается основными принципами и методами измерения поляризационной модовой дисперсии PMD и потерь, зависящих от поляризации PDL, в волокне, в том числе и для компонентов систем WDM.

Группа FO-6.6.5 работает над такими направлениями, как нелинейные эффекты в волокне, новые волокна с низким поглощением группами -ОН, измерение PMD на основе анализа собственных значений матрицы Джонса и метода анализа сферы Пуанкаре.

Табл. 6.3. Структура подкомитетов ассоциации TIA

| | | | |
|----------|---|----------------|---|
| FO-2.1 | Подкомитет по одномодовым системам | FO-6.3.6 | Стыки и муфты |
| FO-2.1.1 | Рабочая группа по устройствам, подсистемам и системам с оптическим усилением | FO-6.3.8 | Надежность пассивных компонентов |
| FO-2.1.2 | Рабочая группа по разработке систем передачи по одномодовому волокну | FO-6.3.10 | Спецификация соединителей |
| FO 2.2 | Подкомитет по цифровым многомодовым системам | FO-6.6 | Волокна и материалы |
| FO-2.2.1 | Модовая зависимость полосы пропускания | FO-6.6.1 | Замкнутые системы измерений и многомодовые оптические измерения |
| FO-2.3 | Оптоэлектронные источники, детекторы и устройства | FO-6.6.2 | Документы по спецификации волокна |
| FO-2.4 | Подкомитет по оптическим терминам, определениям, контролю документов и безопасности | FO-6.6.3 | Сенсорные волокна FO-6.6.5 Одномодовые волокна |
| FO-2.5 | Подкомитет по наружным кабельным системам | FO-6.6.6 | Волокна со ступенчатым профилем показателя преломления |
| FO-2.6 | Подкомитет по надежности волоконно-оптических и активных оптических компонентов | FO-6.6.7 | Защитная оболочка волокна |
| FO-6.1 | Волоконно-оптическое полевое и измерительное оборудование | FO-6.6.8 | Долгосрочная надежность волокна |
| FO-6.1.1 | Рабочая группа по метрологии и калибровке | FO-6.6.9 | Согласование международных стандартов |
| FO-6.3 | Соединительные устройства | FO-6.7 | Волоконно-оптические кабели |
| FO-6.3.1 | Надежность связующих веществ в оптических наконечниках | FO-6.7.1 | Редакторская группа |
| FO-6.3.3 | Геометрические измерения наконечников (волокна) | FO-6.7.10 | Цветовая маркировка волоконно-оптических кабелей |
| FO-6.3.4 | Стандарты на взаимосочленяемость | FO-6.7.14 | Водородная восприимчивость |
| FO-6.3.5 | Пассивные волоконно-оптические разветвители | FO-6.7.15 | Официальные связи с ИЕС /Маркировка. |
| | | FO-6.7.16 | Специальная целевая группа по кабельным маркерам |
| | | FO-6.7.17 | Целевая группа по тестам на прочность |
| | | FO-6.8 | Спецификация структуры сети и процесса работы |
| | | FO-6.9 | Волоконно-оптические датчики |
| | | FO-6.9.3/6.6.3 | Сенсорные волокна |
| | | FO-6.9.4 | Рабочая группа по PN соединителям |

6.4 НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Многие сложные вопросы пока являются открытыми и ожидают соответствующего обсуждения и рекомендаций со стороны ИТУ-Т и ИЕС. К ним относятся:

- Спецификация ИТУ для многоканальных систем (спецификация по вопросу совместимости ожидается в ближайшем будущем);
- Уменьшение шага сетки ИТУ со 100 ГГц до 50 ГГц и в дальнейшем до 25 ГГц;
- Стандарты для работы систем DWDM в расширенном диапазоне длин волн (1528-1602 нм);
- Увеличение числа каналов (длин волн) до 128 и в дальнейшем до 256 и более;
- Увеличение диапазона полных потерь с 22 дБ до 25 дБ;
- Спецификации на оптическое наблюдение или контрольный канал для линий связи по схеме «точка-точка» протяженностью 40-80 км;
- Выделение в сетке ИТУ частот под оптический контрольный канал, что позволит работать с ним наравне с обычными информационными каналами;
- Ограничение мощности лазеров уровнем +17 дБм для их соответствия IIIb классу безопасности (можно создавать и более мощные лазеры, вплоть до 1 Вт, однако работа с лазерами IV класса безопасности требует больших затрат, а потому их сложно предложить для инвесторов);
- Рассмотрение существующего верхнего предела используемых длин волн (1650 нм), который на данный момент выглядит непреодолимым из-за ограниченный рабочего диапазона усилителей OTDR, затухания в волокне и некоторых других соображений.

Как уже указывалось, четко определенные стандарты исключительно важны для внедрения новых технологий. В настоящее время системы DWDM начинают активно использоваться в сетях городского и регионального масштабов. Хотя организации по стандартизации уже работают в этом направлении, многие вопросы еще остаются открытыми. В следующей главе мы рассмотрим применение систем DWDM в сетях городского и регионального масштабов и соответствующие изменения в процедурах их тестирования.

РУКОВОДСТВО

W D M

ГЛАВА 7

СЕТИ ГОРОДСКОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБОВ

7.1 НОВАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ DWDM

В недавнем прошлом волоконно-оптические технологии, в частности, технология DWDM применялись в основном на линиях связи уровня OC-48 (STM-16) и OC-192 (STM-64) протяженностью 50 км и более. Однако сейчас эти технологии начинают применяться в совершенно новой области – сетях городского и регионального масштабов, которые предоставляют услуги связи в пределах городов и других ограниченных областей непосредственно по кабельным сетям клиентов. На рис. 7.1 показано место сетей городского и регионального масштабов в общей иерархии сетей связи.

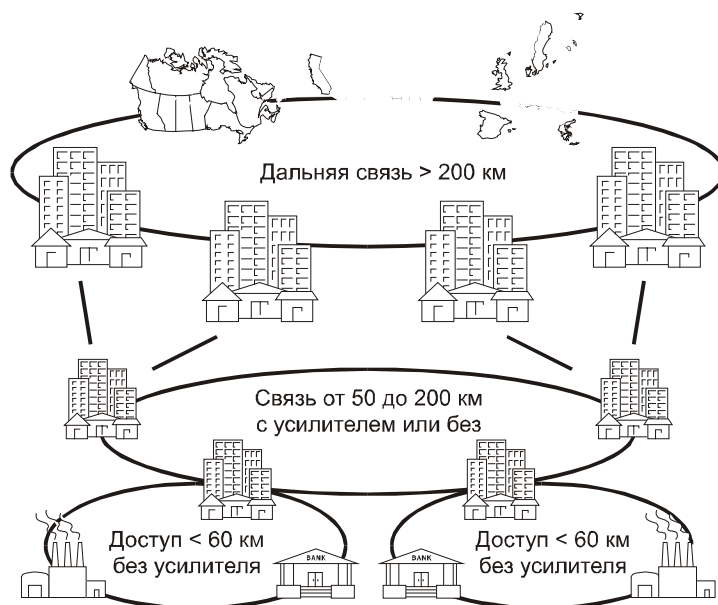


Рис. 7.1 Иерархия сетей WDM

Потребности операторов локальных сетей связи в увеличении полосы пропускания постоянно растут. Прокладка нового кабеля в городских условиях обычно требует больших затрат и связана с множеством проблем, включая гражданско-правовые проблемы. Увеличение пропускной способности отдельных волокон с помощью технологии TDM часто экономически невыгодно, так как для добавления и выделения низкоскоростных – и, соответственно, малоприбыльных – каналов требуется достаточно дорогое оборудование.

В принципе, технология DWDM может обеспечить городским сетям требуемую производительность. До недавних пор применение технологии DWDM в городских сетях сдерживалось высокой стоимостью оборудования, которого для городских сетей нужно намного больше, чем для сетей высокой протяженности. Сейчас оборудование DWDM уже доступно для этого рынка, и объем продаж в 1998 г. составил 200 млн. американских долларов. Предполагается, что рынок будет существенно расти и в 2003 году объем продаж достигнет 2 млрд. американских долларов.

Ожидается, что до 2005 года до 15% частных пользователей потребуются линии связи с пропускной способностью 1,5 Мбит/с, и 20% из этой группы пользователей – линии связи 2 Мбит/с и выше. В секторе малого бизнеса спрос намного более впечатляющий: к концу 2005 года каналы передачи со скоростью выше 2 Мбит/с потребуются 85% малых предприятий, а 20% из них – со скоростью свыше 45 Мбит/с.

СЕТИ ГОРОДСКОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБОВ

Сети доступа на основе медных кабелей вряд ли смогут удовлетворить такой рост потребности в производительности. Более того, во многом они сдерживают рост спроса, так как клиенты слабо интересуются услугами, которые нельзя продемонстрировать. Проблема может быть решена за счет использования в локальных сетях доступа оптического волокна и систем WDM городского масштаба.

7.2 ТЕХНОЛОГИЯ DWDM В ГОРОДСКИХ СЕТЯХ

Применение технологии DWDM на уровне городских сетей дает провайдерам значительную гибкость, которая позволяет им предлагать услуги для различных секторов рынка. Прозрачность оптической передачи позволяет осуществлять локальную связь по существующим протоколам (IP, Ethernet и т. д.) с добавлением защиты на уровне линий SONET/SDH. Затраты на расширение сети достаточно низки, так как оборудование DWDM для коротких городских линий связи значительно дешевле, чем намного более сложное оборудование для линий связи большой протяженности.

Нельзя сказать, что системы DWDM городского масштаба обязательно проще, чем их аналоги на линиях высокой протяженности. Для локальных сетей связи намного важнее гибкость. При их проектировании необходимо предусматривать как можно большее число возможных конфигураций с возможно меньшей зависимостью от применяемых протоколов передачи. Огромное значение имеют также соответствующие средства управления, которые должны позволять реализовывать эту гибкость просто, быстро и экономично.

Установка системы DWDM городского масштаба не подразумевает обязательного отказа от существующих сетей SONET/SDH: они могут существовать параллельно, причем определенные части систем DWDM могут передавать трафик SONET/SDH. Более того, для эффективного использования полосы пропускания систем DWDM трафик SONET/SDH, IP или ATM в оригинальном формате, можно передавать по различным каналам. Системы DWDM городского масштаба позволяют также передавать трафик таких протоколов, как Gigabit Ethernet, FDDI и ESCON. Хотя передавать “неэффективно использующие время” сигналы типа Gigabit Ethernet в их оригинальном формате по каналам DWDM высокой протяженности не всегда экономично, иногда имеет смысл это делать для коротких дистанций, типичных для городских сетей связи.

При достижении участками сети, использующими SONET/SDH, максимальной загрузки их можно постепенно заменять линиями DWDM. При этом возможно как сохранить старые каналы SONET/SDH, так и предложить новые услуги с низкими дополнительными издержками. Пропускная способность систем DWDM может расти до тех пор, пока остаются свободные каналы.

Хотя линии городских систем DWDM имеют относительно небольшую протяженность, в них чаще всего приходится использовать линейные оптические усилители (обычно EDFA). Так как наличие или отсутствие усилителей EDFA в линии связи определяет ее стоимость, сети DWDM городского масштаба обычно подразделяют на две группы: магистральные (междофисные) сети и сети доступа.

Магистральные линии связи обычно имеют протяженность более 50 км, и для них типичны оптические и технические ограничения систем такой протяженности. При этом требования к их гибкости остаются высокими. Например, они могут использо-

ваться провайдерами для предоставления высококачественных услуг связи. Хотя для линий такой протяженности часто требуются линейные оптические усилители, они могут быть достаточно экономичными при работе на низких скоростях передачи, что снижает стоимость таких систем.

Короткие линии связи городских сетей доступа имеют множество преимуществ. Для них становятся не нужными усилители EDFA, что дает ощутимую экономию средств. Отсутствие усилителей EDFA приводит к существенному снижению требований к характеристикам сигнала, в частности, точности длины волны. Соответственно, упрощается выбор, тестирование и техническая поддержка компонентов (хотя для этих компонентов вносимые и другие потери могут оказаться даже более критичными). Кроме этого нелинейные явления в компонентах и волокне перестают вызывать какие-либо проблемы. Наконец, при отсутствии усилителей EDFA можно увеличить число каналов и/или расстояние между ними за счет применения длин волн за пределами рабочего диапазона усилителей EDFA и еще больше снизить требования к качеству компонентов. Конфигурация и набор оборудования для городских сетей доступа за счет их простоты, могут достаточно сильно отличаться от сетей большой протяженности.

Городские системы DWDM часто имеют кольцевую топологию (либо в виде двух колец с противоположными направлениями передачи, либо в виде одного двунаправленного кольца), которая совместима с кольцевой топологией сетей SDH. Схемы мониторинга и защиты обеспечивают быстрое переключение каналов на резерв (за время порядка десятков миллисекунд) в случае выхода из строя какого-либо компонента или волокна.

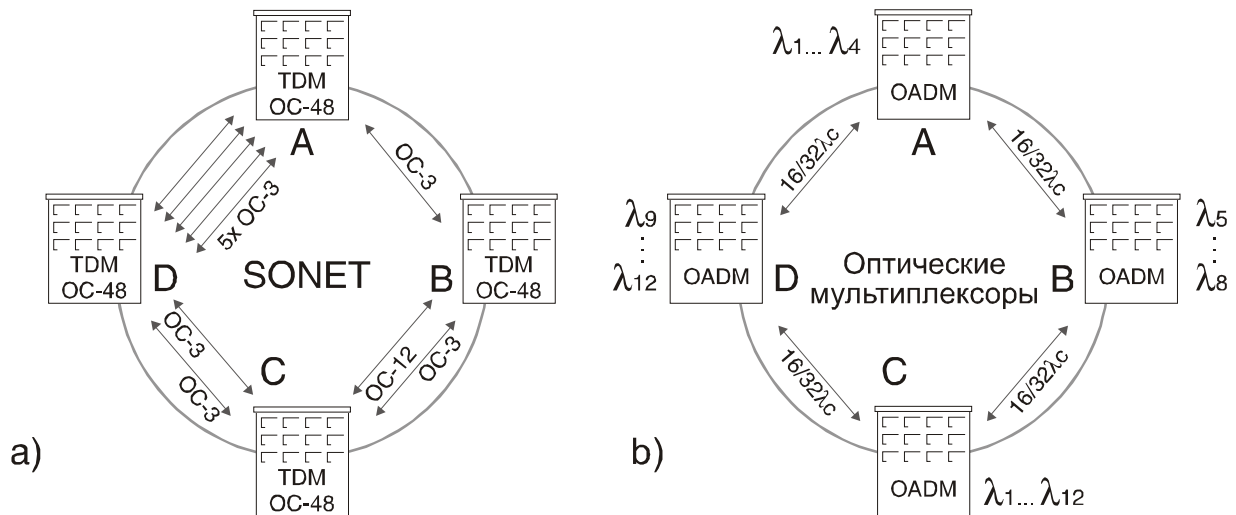


Рис.7.2. Городские сети:
 а) кольцо TDM перегружено между узлами сети A и D;
 б) рациональное решение - кольцо WDM

В кольцевой сети DWDM каналы добавляются и выделяются в произвольных точках кольца, поэтому балансировка каналов может быть затруднена, хотя из-за отсутствия усилителей EDFA она становится намного менее существенной. Кольцевая топология сети сама по себе также может приводить к определенным проблемам. Например, для доставки услуг кабельного телевидения в квартиры лучше всего подходят сети топологии типа "дерево". К счастью, для кольцевых сетей DWDM разработаны способы орга-

СЕТИ ГОРОДСКОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБОВ

низации различных сетевых топологий (“дерево”, “точка-точка”, широковещание и др.) за счет соответствующего использования большого числа доступных каналов в кольце. Тем не менее, создание некоторых логических конфигураций сети может потребовать определенных изменений в физической сети.

Городская сеть DWDM (рис.7.2, b) более экономична, чем традиционные линии связи SONET/SDH (рис.7.2, a). Сложность оборудования добавления/выделения каналов в сетях DWDM зависит только от характеристик этого канала, ему не приходится работать со всей информационной полосой линии связи. Кроме того, переход линии связи на технологию DWDM и добавление новых услуг не нарушает передачу существующего трафика, что особенно важно при постоянных изменениях предоставляемых услуг.

7.3 БОЛЬШЕ, ЧЕМ ПРОСТО УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Переход от электрической к полностью оптической сети может произойти раньше или позже, но в любом случае замена или дополнение одноканальной городской сети или городской сети TDM системами DWDM дает намного больше, чем просто увеличение ее пропускной способности.

Передача сигналов в сетях DWDM не ограничена определенными временными кадрами или протоколами, выбор которых до этого часто определялся возможностями используемых в сети систем передачи, а не удобством для пользователей. По сети DWDM могут одновременно передаваться данные в самых разных форматах, в том числе аналоговые по своей сути потоки голоса и видео, в широком диапазоне скоростей. Удобные для пользователя протоколы – например, Ethernet – могут пропускаться прозрачно, без какой-либо трансформации сигнала, и в самой сети не нужно учитывать требования конкретного транспортного протокола.

Передачу информации в каждом канале и ее целостность можно резервировать индивидуально, в соответствии с конкретными требованиями для каждого канала. В частности, можно ограничиться существующими схемами резервирования на основе технологии SONET/SDH, без каких-либо специальных дополнительных мер. Маршрутизация в сети может быть достаточно гибкой и поддерживать самые разные приложения, от организации линии связи топологии “точка-точка” до сбора данных и широковещательных приложений.

Помимо всех этих преимуществ, городские сети DWDM во многих случаях очень просто соединяются с магистральными сетями с сохранением скоростей и протоколов передачи. Компоненты и системы для городских сетей DWDM в последнее время становятся доступны: цена двухволоконной междуофисной линии связи составляет от 30 до 50 тыс. долларов США за канал, стоимость городских сетей доступа еще ниже.

Наряду с предложением новых услуг, переход к системам DWDM должен обеспечивать клиенту все те механизмы резервирования, которые предусмотрены в сетях SONET/SDH. Для этого требуется тщательное всестороннее планирование сети, основными факторами при котором является цена, функциональность и возможность расширения сети в будущем.

7.4 ВЛИЯНИЕ НА ВОПРОСЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Сравнивая тестирование систем DWDM городского масштаба и систем большой протяженности, нужно отметить следующее. В городских сетях DWDM необходимо контролировать те же самые параметры, но из-за определенных стратегических и экономических соображений диапазон их допустимых значений шире, а процедуры тестирования, соответственно, проще. Важное отличие – портативность и простота оборудования для тестирования систем DWDM. Структура городской сети намного более сложна и разветвлена, в ней применяется большое количество оптического передающего оборудования, и оборудование для тестирования систем DWDM используется разными пользователями во множестве точек сети. Поэтому оборудование для измерения и тестирования должно быть портативным. Кроме того, оно должно иметь достаточно низкую цену, так как потребуется большое его количество. Поскольку линии связи городских систем DWDM имеют меньшую протяженность, а из-за отсутствия оптических усилителей в них возможна передача на длинах волн в области 1310 нм, требования к оптическим характеристикам городских систем DWDM намного ниже, чем для магистральных систем большой протяженности. Для тестирования городских систем DWDM можно применять достаточно простое оборудование, позволяющее быстро проводить измерения с требуемой точностью.

Помимо относительно простого оборудования для тестирования городских систем DWDM, требуется мощное “интеллектуальное” программное обеспечение, которое позволяет быстро проводить анализ результатов тестирования. Должна также быть предусмотрена возможность автоматического тестирования, поскольку техническому персоналу достаточно сложно проводить измерения множества параметров городских сетей. Автоматические процедуры тестирования позволяют пользователям не допускать типичных ошибок на начальном этапе измерений.

Сети DWDM городского масштаба – лишь одно из множества новых областей применения технологии DWDM. В следующей главе мы обсудим основные тенденции развития телекоммуникаций и соответствующие изменения в оборудовании и методиках измерения.

РУКОВОДСТВО W D M

ГЛАВА 8

ПЕРСПЕКТИВЫ

8.1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

В предыдущих главах мы рассказали о технологиях, которые используются при проектировании и построении современных оптических сетей. Каковы будут дальнейшие направления их развития?

По мере разработки более эффективных методов борьбы с различными оптическими явлениями, ограничивающими максимальную скорость передачи волоконно-оптических сетей связи (поляризационно-модовая дисперсия, хроматическая дисперсия и особенно нелинейные эффекты), появляется возможность постепенного увеличения числа каналов и скорости передачи систем WDM. Рост общей скорости передачи двояко влияет на поведение провайдеров на рынке услуг связи. С одной стороны, необходимость эффективного использования высокой пропускной способности приведет к большей централизации передачи данных. С другой стороны, рост производительности позволит повысить конкретизацию предлагаемых услуг и, в конечном счете, позволит предоставлять по требованию каждому пользователю канал с необходимой скоростью и надежностью.

Предсказать, как будут развиваться технологии, или хотя бы насколько долго и успешно будут использоваться существующие, практически невозможно. Тем не менее, можно предположить, что в ближайшем будущем важную роль в волоконно-оптической связи будут играть следующие методы и технологии (см. табл. 8.1).

Табл. 8.1 Развитие технологий

| | ПРОШЛОЕ | НАСТОЯЩЕЕ | БУДУЩЕЕ |
|--------------------------------|--|---|---|
| Волокно | <ul style="list-style-type: none"> • волокно с ненулевой смещенной дисперсией • компенсация дисперсии | <ul style="list-style-type: none"> • волокно с управляемой дисперсией • улучшенная компенсация дисперсии • более низкие потери | <ul style="list-style-type: none"> • многоцветность • сверхнизкие потери • солитоны |
| Передача | <ul style="list-style-type: none"> • 0,5 Тбит/с • 2,5 Гбит/с в канале (на длину волны) • 32 канала в системе DWDM | <ul style="list-style-type: none"> • 1,2 Тбит/с • 10 Гбит/с в канале (на длину волны) • 128 каналов в системе DWDM | <ul style="list-style-type: none"> • 2-5 Тбит/с • 40 Гбит/с в канале (на длину волны) • солитоны • более 200 каналов в системе UDWDM |
| Управление полосой пропускания | <ul style="list-style-type: none"> • электрическая передача • асинхронная передача, SONET/SDH • интерфейсы <10 Гбит/с • уровень модульности STS (STM) | <ul style="list-style-type: none"> • электрическая и оптическая передача • многопротокольность, сетка частот ITU • интерфейсы до 10 Гбит/с • уровень модульности STS (STM) • DCS | <ul style="list-style-type: none"> • оптическая передача • многопротокольность, сетка частот ITU • интерфейсы до 40 Гбит/с • уровень модульности STS-3c • быстрая коммутация |

8.2 ВОЛОКНО

Теоретически пропускная способность волокна огромна. Для одномодового волокна она составляет по меньшей мере 50 ТГц. Однако для достижения этих астрономических скоростей передачи требуется значительное развитие различных технологий. В ближайшем будущем возможно появление систем емкостью до 400 каналов. Даже если предположить, что каждый из них будет работать на скорости 2,5 Гбит/с (с оптическим отношением сигнал/шум 20 дБ), полная пропускная способность таких систем достигнет 1 Тбит/с. Дальнейшее развитие технологий, насколько сейчас можно судить, позволит увеличить полную пропускную способность по крайней мере до 2,5 Тбит/с.

Основной используемой технологией останется DWDM. Существующие мультиплексоры ввода/вывода каналов, которые не имеют возможности настройки, уступят место сначала настраиваемому, а затем и дистанционно управляемому оборудованию. Сложность сетей будет возрастать, особенно при появлении специализированных услуг, которые требуют особых логических конфигураций (например, кабельное телевидение). Будет продолжать расти число каналов, а вместе с ним – требования к стабильности лазеров, точности фильтров и средствам контроля мощности сигнала и шума. Сети DWDM, использующие коммутацию пакетов и ячеек и поддерживающие интерфейсы SONET/SDH, ATM, Gigabit Ethernet и IP, позволят крупным компаниям иметь «собственные» длины волн и осуществлять защищенную и гибкую связь между различными сайтами.

Близка к завершению разработка технологии передачи трафика IP (Internet Protocol) по оптическому волокну. Эта технология позволит радикально сократить требуемую пропускную способность и, по-видимому, будет сразу же внедрена на всех уровнях услуг Интернет.

В течение последних нескольких лет пропускная способность сетей удваивается каждые шесть месяцев за счет прокладки нового волокна. Использование кабелей, состоящих из многих сотен волокон, и широкое применение 128-канальных систем DWDM позволит в ближайшем будущем сохранить эти темпы.

8.3 КОМПОНЕНТЫ

Все большая часть функций будет возлагаться на передающие компоненты, в частности, транспондеры. Обработка SONET/SDH, прямая коррекция ошибок, автоматическая защитная коммутация, проверка уровня битовых ошибок и мониторинг сигнала будут осуществляться ими под автоматическим контролем с использованием оптического управляющего канала.

Существующее электронное оборудование будет постепенно заменяться новыми оптическими устройствами, и сети будут все более приближаться к «полностью оптическим». Уменьшится сложность сетевого оборудования, так как сигналы не будут преобразовываться из оптической формы в электрическую и обратно, однако усилится влияние оптических явлений на целостность передаваемых сигналов.

Есть один фактор, который может ограничить широкое распространение полностью оптических сетей. Пока неясно, обеспечат ли когда-либо прозрачные линии связи все

требуемые возможности мониторинга, тестирования и управления передачей информации на физическом (битовом) уровне.

Лазеры DFB будут совершенствоваться и еще какое-то время использоваться в качестве передатчиков в системах DWDM. Тем не менее, не за горами появление новых технологий.

Уже разработаны многоэлектродные лазеры, рабочая длина волны которых управляется непосредственно сигналом, приложенным к лазерному чипу. Другой метод заключается в том, что в одной полупроводниковой подложке создается линейный массив лазерных резонаторов, каждый из которых настроен на свою длину волны и имеет отдельное электронное управление. Сообщалось о создании чипа с 40 такими каналами. Принципиально новый метод – одновременная генерация всех требуемых длин волн от одного лазерного передатчика за счет использования эффекта чирпирования. Сообщалось о разработке устройства на 206 каналов.

Новые технологии передачи требуют разработки и использования усовершенствованных методов мультиплексирования и демупльтиплексирования, а также новых принципов проектирования сетей. Несмотря на это, появление новых оптических передатчиков должно позволить уменьшить стоимость систем DWDM и увеличить возможности таких сетей.

8.4 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Несмотря на то, что солитонные системы связи пока еще не стали коммерчески доступными, многое говорит о быстром развитии технологии солитонной передачи. Основным катализатором активных исследований в этой области служит расширение рынка подводных линий связи сверхвысокой протяженности, для которых требуется экономичная и сверхдальняя технология передачи, подобная солитонной.

В солитонных системах не нужны повторители и оптические усилители, а потому появление таких систем уменьшит затраты на передачу информации. Объем публикаций и исследований, выполняемых университетскими и промышленными научными центрами, служит несомненным показателем огромного интереса к этой области и позволяет надеяться, что через некоторое время солитонные системы связи станут коммерчески доступны.

На пороге широкого применения стоит технология «волокно до дома» FTTH (Fiber to The Home). Единственное препятствие, из-за которого эта технология пока коммерчески невыгодна и не применяется повсеместно – высокая цена трансивера, который требуется устанавливать в каждом доме. Возможно, использование беспроводной передачи на конечном отрезке линии связи (технология «волокно почти до дома») уже в ближайшее время обеспечит приемлемые скорости передачи без необходимости широкого развертывания совершенно новой волоконно-оптической инфраструктуры. Ожидается, что через 10 лет технологиями «волокно до дома» и «волокно почти до дома» будет охвачено 50% всех домов. Активно разрабатываются недорогие поверхностные лазеры с вертикальным резонатором VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) с длинами волн в областях 1310 нм и 1550 нм.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Еще одна многообещающая технология для локальных сетей и других линий связи небольшой протяженности – WDM по многомодовому волокну. При совместном применении с технологией FTTH она, возможно, обеспечит меньшую стоимость и большую надежность по сравнению с конкурирующими технологиями.

Важно отметить, что рост требований к увеличению полосы пропускания не ослабевает. Феноменальный рост трафика Интернет показал провайдерам, что может произойти при появлении совершенно новых услуг. Пользователи уже знакомы с HDTV, и миллионы домашних зрителей могут предпочесть спутниковой тарелке на крыше своего дома скромный кабель. Все попытки популяризации таких широкополосных услуг, как видеотелефония, провалились, в частности, из-за жестких ограничений на ширину полосы. Однако эти ограничения рано или поздно будут устранены, и пока сложно даже представить, как возрастут требования пользователей.

Интенсивность использования сетей передачи данных для бизнеса, начиная от связи между офисами и заканчивая мониторингом производственных процессов, также не показывает никаких признаков ослабления. Стоит только вспомнить недавние страхи по поводу проблемы 2000 года, чтобы зависимость современной промышленности от надежной связи стала очевидной. Дальнейшее увеличение стоимости путешествий обеспечит все большую привлекательность для видеоконференций, особенно при дальнейшем развитии технологий. Хотя огромная пропускная способность волоконно-оптических систем легко удовлетворит любое разумное повышение спроса, мы не должны забывать предсказания, сделанного в начале компьютерной революции: “Возможно, пятюк-другой этих странных штуковин будет обслуживать всю Северную Америку”.

РУКОВОДСТВО WDM

ГЛАВА 9

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

В предыдущих главах речь шла о компонентах систем WDM. Были рассмотрены важнейшие параметры, которые необходимо измерять для системы в целом или на уровне составляющих ее компонентов. Тестовые измерения большинства продуктов можно проводить многочисленными способами. В данной главе на конкретных примерах будут представлены некоторые полные решения компании EXFO и применяемое измерительное оборудование.

На примерах кратко представлены основные этапы производства отдельных компонентов систем WDM, предшествующие их окончательному монтажу, вводу в эксплуатацию и сопровождению. Перечислим эти этапы:

- квалификационные испытания оптических каналов связи;
- контроль качества отдельных компонентов;
- ввод в эксплуатацию;
- мониторинг;
- поддержка и восстановление работоспособности в случае неисправностей.

Очевидно, что измерительные приборы, представленные в этих примерах, в зависимости от производителя, могут быть другими и возможен их выбор, отличный от предлагаемого компанией EXFO. Поэтому еще раз отметим, что это не общепринятые стандарты, а решения компании EXFO. Вполне возможно, что приборы компании EXFO изменятся в ближайшие несколько лет или даже месяцев. Идет естественный процесс замены предшествующих моделей более современным измерительным оборудованием, поэтому за более подробной информацией о новых и существующих приборах рекомендуем обращаться к региональным представителям или непосредственно в компанию EXFO.

Телекоммуникационные компании вкладывают средства в системы WDM, чтобы полнее использовать возможности уже существующих сетей SONET/SDH. В них очень мало оптических волокон и, следовательно, для увеличения полосы пропускания необходимо использовать несколько длин волн в одном волокне. На ближайшие два или три года прогнозируется взрывной рост сетей связи, поэтому компаниям нужны системы, способные к модернизации. Переходя к технологии WDM, владельцы сетей сразу получают систему на 32 оптических канала с планируемым увеличением ее емкости до 128 каналов в будущем. Частотный интервал между каналами первоначально составляет 100 ГГц (0,8 нм), но при модернизации системы уменьшится до 50 ГГц (0,4 нм). Более того, система может быть двунаправленной, например, 16 каналов передают сигнал в одном направлении и еще 16 каналов – в противоположном направлении.

В настоящее время используют скорости передачи 2,5 Гбит/с. Реализовав переход к системам WDM, компании получают сети со скоростями до 10 Гбит/с и, вполне очевидно, что с удешевлением подобного оборудования, станет возможным дальнейший рост скорости передачи до 40 Гбит/с. Такая сеть имеет топологию по схеме “точка-точка” – отдельная линия связи протяженностью 180 км с оптическим усилителем, расположенным примерно через 90 км. Отметим, что волокно, которое будет использоваться для этих целей, было проложено в начале 90-ых годов и никогда тщательно не тестировалось на пригодность к современным потребностям.

Без предварительного обследования сети не может быть и речи о покупке и вводе в эксплуатацию системы WDM. Следовательно, заказчик заранее должен знать, обладает ли оптический канал связи необходимыми характеристиками для осуществления передачи на новых длинах волн.

9.1 КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИНИИ СВЯЗИ

Перед закупкой и вводом в эксплуатацию новой системы абсолютно необходимо проведение квалификационных испытаний оптической линии связи. При определении ограничений системы и возможностей ее обновления ведущую роль играет физический канал передачи. Прибегая к сравнению, можно сказать, что самый совершенный автомобиль не сможет показать все свои возможности на неподходящей для него дороге. При тестировании линии связи следует принимать во внимание не только текущие потребности, но и будущие требования к ней. В данной главе рассмотрен случай, когда тестирование линии связи должно проводиться с учетом планируемого использования системы на 128 каналов при скорости передачи 40 Гбит/с.

В большинстве случаев квалификационные испытания линии связи будут проводиться на центральном узле или в других помещениях. Площади для размещения тестового оборудования могут варьироваться от достаточной до весьма ограниченной. В рассматриваемом конкретном случае компания располагает небольшим участком в подсобном помещении, расположенном недалеко от центрального офиса. Это одна из причин, по которой переносные приборы необходимы уже на начальных этапах проведения измерений. Обычно до развертывания системы у заказчика вообще нет необходимых инструментов. Поэтому компании-производители, такие как EXFO, предлагают все необходимое тестовое оборудование, то есть, источники излучения, разветвители, переключатели и различные виды фотодетекторов.

Для квалификационных измерений оптической линии связи, предлагается проведение следующих измерений:

- потерь;
- оптических потерь на отражение ORL;
- поляризационно-модовой дисперсии PMD;
- хроматической дисперсии;
- нелинейных эффектов.

Так как линия связи в существующей сети уже работает, то тестировать ее целостность необязательно. Однако обследовать линию связи необходимо. Если есть возможность провести измерения при отключении системы связи, то следует ею воспользоваться для проведения контрольных измерений в полном объеме.

При каждом тестировании требуется соединять различные компоненты. Отметим, что разъемы приборов, а также соединительные кабели в системе или в оптической линии связи должны быть всегда чистыми. Оптический телефон помогает координировать тестовые процедуры, выполняемые на обоих концах волокна, рис. 9.1. Все полученные результаты следует сохранять для будущих проверок. Вот что мы предлагаем:



Рис. 9.1 Оптический телефон позволяет поддерживать связь по тестируемому кабелю обслуживающему персоналу

1. Профиль линии. Общую характеристику линии связи определяют с помощью рефлектометра OTDR. Идеально провести измерения на трех длинах волн - 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм. Рефлектометр присоединяют к выходному кабелю. Устанавливают параметры рефлектометра в режиме «Эксперт» или используют автоматический режим измерений рефлектометра. После того как измерение проведено в одном направлении, оператор на другом конце линии может приступить к такому же измерению в обратном направлении. Затем с помощью программы ToolBox Process выполняют двунаправленный анализ линии связи. Двунаправленный анализ с помощью рефлектометра OTDR полезен для определения характера потерь в некоторых случаях, когда потери зависят от направления распространения оптического сигнала, рис. 9.2.

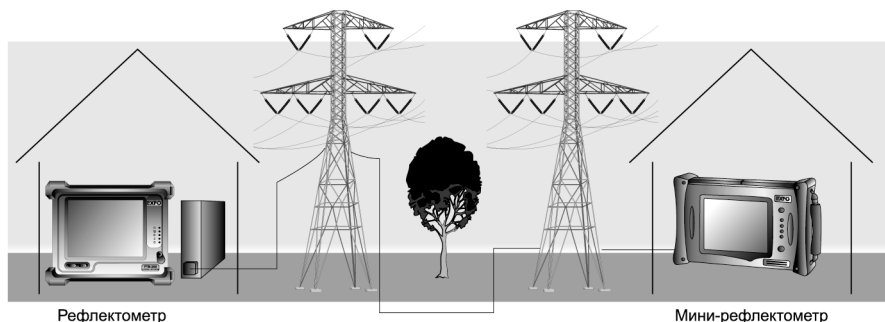


Рис. 9.2 С помощью рефлектометра получают профиль линии связи на заданной длине волны

2. Потери. Измеритель оптических потерь намного точнее измеряет потери, чем рефлектометр. Он также позволяет проводить двухсторонние измерения. Для измерений используют модуль MultiTest или многофункциональный тестер MaxTester (целесообразно провести измерения на длинах волн 1550 нм и 1625 нм) Для автокалибровки этого прибора необходимо к входу детектора присоединить выход источника излучения. Для анализа потерь в обоих направлениях используют опцию прибора FasTesT, рис. 9.3.

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

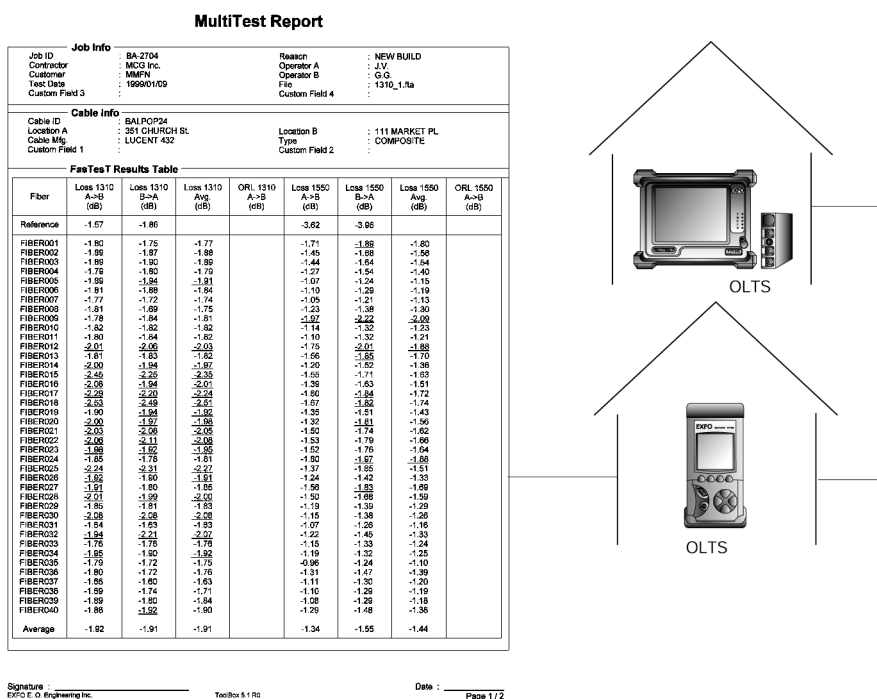


Рис. 9.3 С помощью измерителя оптических потерь измеряют потери в прямом и обратном направлении

3. Оптические потери на отражение ORL. С помощью измерителя ORL производят измерение уровня оптических потерь на отражение. Измерение этой величины является важным по той причине, что высокий уровень оптических потерь на отражение может приводить к нестабильности источника излучения или к большому относительному уровню ошибок BER приемника. Измерительный прибор подсоединяют к выходному оптическому кабелю и измерения проводят на рабочих длинах волн системы. Для диапазона длин волн канального плана ITU для измерений используют длину волны 1550 нм, рис. 9.4.

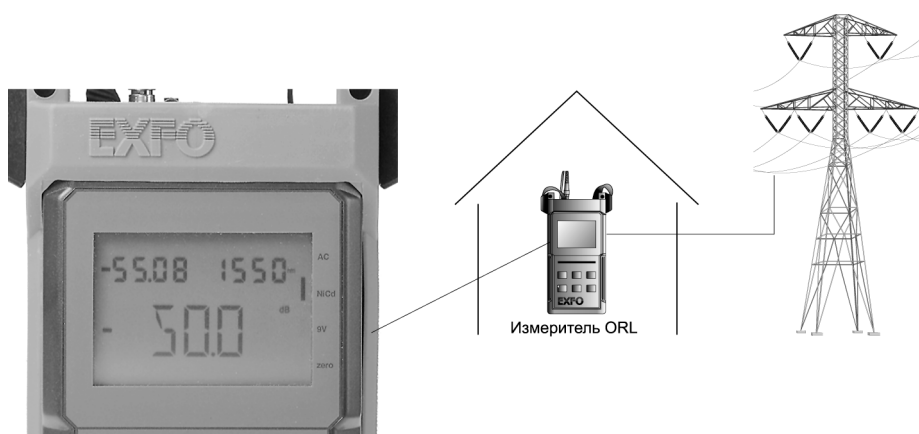


Рис. 9.4 Потери на отражение влияют на стабильность системы

4. Поляризационно-модовая дисперсия PMD. Хотя поляризационно-модовая дисперсия считается сложным явлением, ее измерение легко провести с помощью анализатора PMD, рис. 9.5. От значения величины PMD существенно зависит максимально допустимая скорость передачи в линии связи. Источник поляризованного излучения (1550 нм) присоединяют к дальнему концу линии, а анализатор PMD устанавливают на ближнем ее конце. Между ними не требуется никакой дополнительной связи, но перед проведением измерений источник излучения должен быть включен. При этом необходимо убедиться в том, что мощность излучения на входе измерителя PMD достаточна (PMD power bar на экране измерителя). Для определения коэффициента PMD, необходимо ввести значение оптической длины линии, которое было измерено с помощью рефлектометра. Оператор может выбрать конфигурацию измеряемой линии вручную или использовать автоматический режим измерения; более надежные значения получают, задавая точный диапазон измерений.

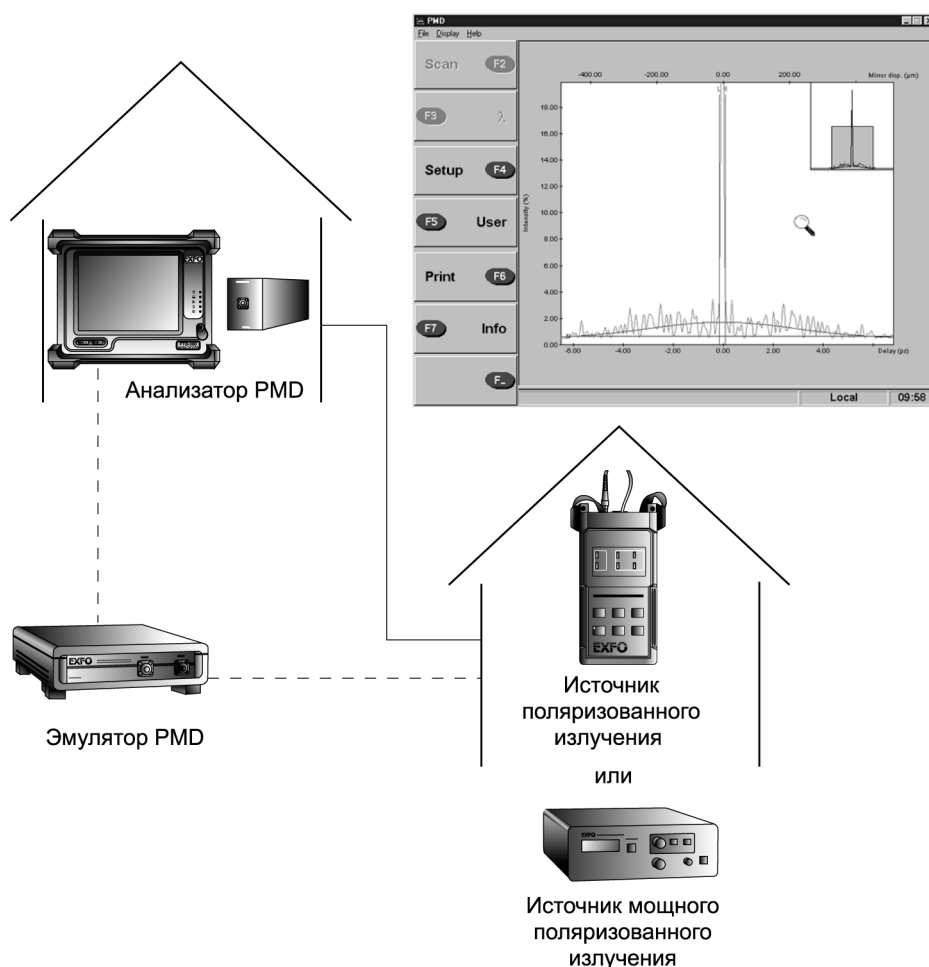


Рис. 9.5 Анализатор PMD используется для определения характеристик линии связи

5. Нелинейные эффекты. Эти явления становятся существенными при использовании большого числа длин волн в линии связи. Для измерения эффекта четырехволнового смещения (наиболее важное нелинейное явление), используют два источника - перестраиваемый лазер и лазер с фиксированной длиной волны совместно со спектральным анализатором OSA. Источники излучения подключают на дальнем конце линии связи с помощью оптического разветвителя с контролером поляризации; анализатор спектра OSA подключают к ближнему концу линии связи. В ходе тестовых измерений два

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

идентичных источника поляризованного света равной мощности настраивают так, чтобы их длины волн были как можно ближе друг к другу. При некотором расстоянии по длине волны обоих источников в спектре на ближнем конце линии появятся два дополнительных пика, обусловленные проявлением нелинейного эффекта. Мощность дополнительных пиков и расстояние между ними указывают на качество линии связи. В том случае, если мощность пиков или интервал между ними велики, могут быть проблемы при установке системы WDM с 128 длинами волн при частотном интервале между каналами 50 ГГц. В приведенном примере (рис.9.6) подобные затруднения не должны возникнуть.

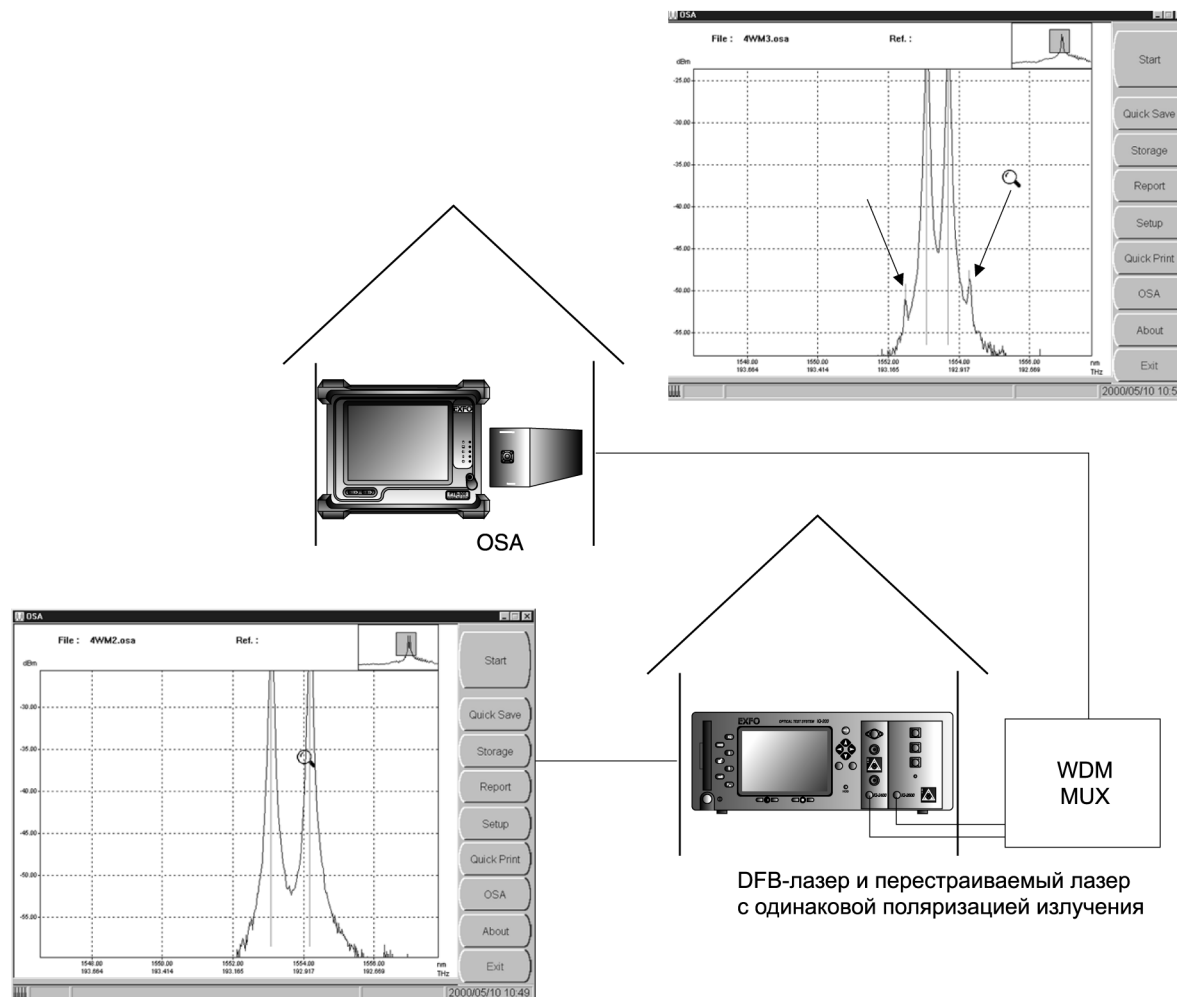


Рис. 9.6 Установите сигналы перестраиваемого лазера и DFB-лазера как можно ближе друг к другу по длине волны и наблюдайте появление боковых пиков

Рассматриваемая линия связи имеет достаточный уровень качества для системы WDM с 128 каналами, но скорость передачи должна быть ограничена значением 10 Гбит/с. Дело в том, что среднее значение PMD, равное 8,3 пс, больше по сравнению со стандартным значением, определяемым Рек. ITU и равным 2,5 пс, для скорости передачи 40 Гбит/с.

На этом тестирование линии связи можно считать законченным.

9.2 ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ: МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ

Компания, производящая и продающая системы WDM, получив заказ, приступает к изготовлению или приобретению каждого необходимого компонента и к сборке законченной системы. На этом этапе требуется провести несколько тестовых измерений компонентов и проверить их на соответствие необходимым техническим требованиям. Безусловно, компоненты тестируются в ходе производства, но тестирование проводят и после их закупки, и перед сборкой системы. Система состоит из множества компонентов различного типа. Они имеют самые разные размеры - от микросхемы до металлических конструкций, относятся к самым разным областям техники – к оптике, механике, электричеству, электронике, магнетизму и даже химии. Ниже перечислены самые важные конечные компоненты:

- передатчики;
- детекторы;
- аттенюаторы;
- переключатели;
- оптические кросс-коммутаторы (ОХС);
- фильтры;
- разветвители;
- устройства компенсации дисперсии (DCD);
- оптические мультиплексоры ввода/вывода (OADM);
- мультиплексоры/демультиплексоры;
- брэгговские дифракционные решетки;
- усилители EDFA или любые другие оптические усилители.

В следующем примере основное внимание сосредоточено на тестах, выполняемых для определения характеристик селективного по длине волны фильтра (мультиплексора). Мультиплексор – неотъемлемая основная часть системы WDM, и ряд его характеристик должны быть протестированы. Именно поэтому он и выбран в качестве примера. Отметим, однако, что набор выполняемых тестов сильно зависит от применяемых компонентов. (Более подробно это вопрос рассматривался в главе 4). Для мультиплексора проводят измерения следующих параметров:

- положение центральной длины волны и частотного интервала между каналами;
- неравномерность спектральной характеристики канала;
- однородность каналов по уровню мощности;
- ширина полосы пропускания;
- уровень перекрестных помех;
- уровень потерь, зависящих от поляризации PDL;
- уровень вносимых потерь;
- уровень направленности;
- уровень потерь на отражение ORL.

Для тестирования разнообразных компонентов предпочтительнее использовать лабораторное оборудование, обладающее наивысшими техническими характеристиками. Ниже приводятся рекомендации по составу оборудования для выполнения следующих видов тестирования:

1. Положение центральной длины волны и частотный интервал между каналами. Основной функцией мультиплексора является объединение всех длин волн (соответственно их разделение для демultipлексора), поэтому необходимо определить все его спектральные характеристики. Эти два параметра измеряют при помощи широкополосного источника ASE и анализатора спектра OSA (автоматизировать процедуру измерений позволяет оптический переключатель), рис. 9.7. Источник присоединяют к одному из входных портов мультиплексора, а к выходному порту присоединяют анализатор. После этого центральную длину волны для каждого канала определяют как полусумму длин волн, на которых уровень спектральных составляющих проходящего света на 3 дБ ниже максимального пикового уровня. Частотный интервал между каналами вычисляют по расстоянию между каждой парой соседних центральных длин волн. Измеренные длины волн должны как можно точнее соответствовать длинам волн, используемым в системе, т.е. частотному плану ITU.

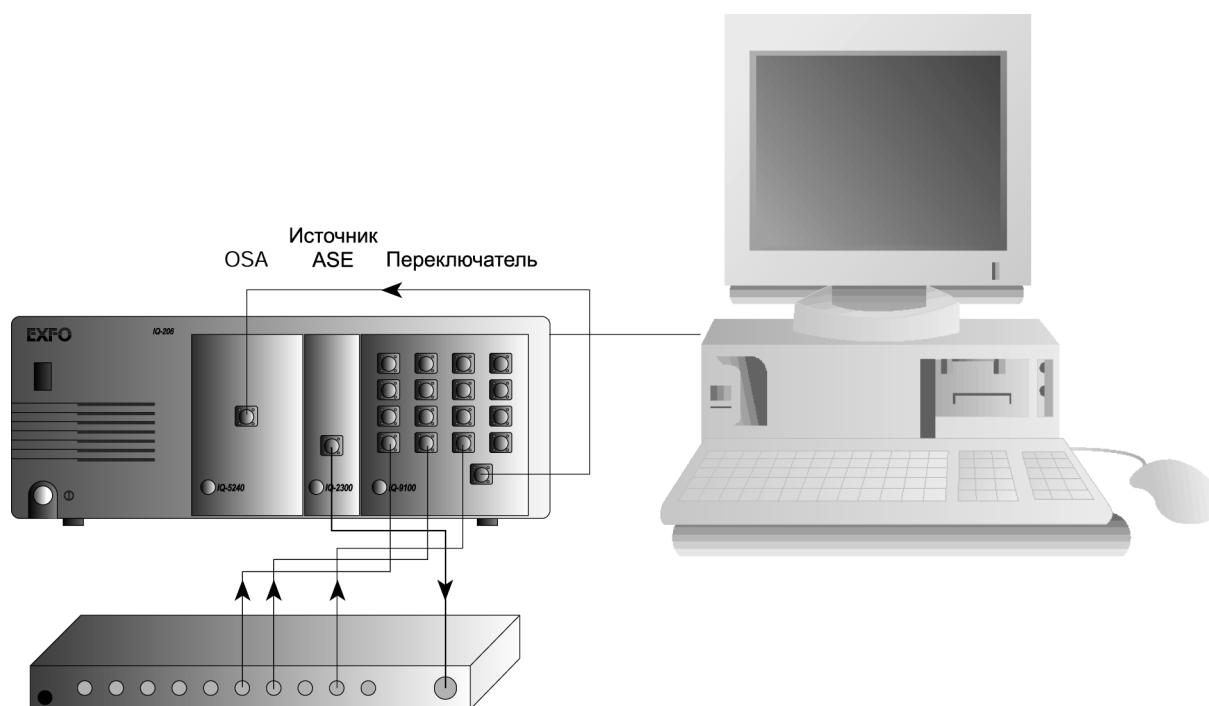


Рис. 9.7 Установка для тестирования демultipлексора

2. Неравномерность спектральной характеристики канала. Неравномерность спектральной характеристики измеряют, используя ту же самую установку. В этот раз исследование направлено на изучение формы спектральной характеристики отдельных каналов. Если бы мультиплексоры были идеальными, то на выходе мультиплексора наблюдался бы строго прямоугольный спектр отфильтрованного сигнала. В действительности же, вместо идеального плато наблюдается пологая кривая с деформированным пиком, рис. 9.8. Неравномерность пика спектральной характеристики обычно вызывается паразитными эталонами Фабри-Перо, порождающими разные модуляционные шумы в спектре. Неравномерность спектральной характеристики обычно чувствительна к состоянию поляризации излучения на входе. Неполяризованный источник

ASE обеспечивает измерение усредненного значения амплитуды пульсаций. Если изменения мощности сигнала в зависимости от длины волны велики (рис.9.8), то это означает, что малое изменение длины волны источника приведет к значительному изменению мощности сигнала на выходе мультиплексора.

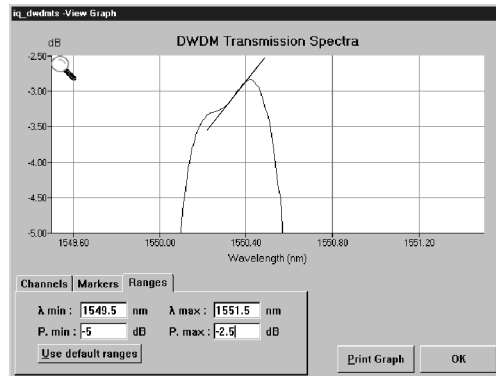


Рис. 9.8 Неравномерность полосы пропускания системы вызывает вариации мощности сигнала

3. Однородность каналов по уровню мощности. Чтобы не допустить различия в выходных уровнях мощности мультиплексированных источников излучения, необходимо проверить однородность каналов – следует сравнить каналы по уровню мощности (на центральной длине волны), а также по ширине спектральных кривых пропускания каналов (ширина полосы канала определяется по уровню 3 дБ от максимума мощности или на половине высоты спектральной характеристики канала), рис. 9.9.

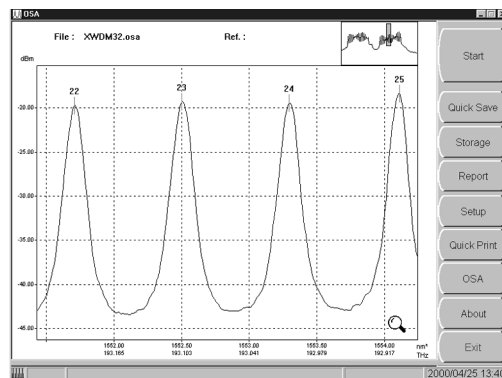


Рис. 9.9 Ширина полосы и мощность каналов должна быть одинаковой

4. **Вносимые потери (дБ).** Вносимые каким-либо компонентом потери IL обычно определяются как разность мощностей на входе p_{in} и выходе p_{out} из данного компонента (сегмент оптической линии связи):

$$IL = p_{in} - p_{out}$$

Значения p_{in} и p_{out} определены в дБм, т.е. в децибелах по отношению к уровню мощности в 1 мВт: $p_{in} = 10\lg(P_{in} / P_1)$, $p_{out} = 10\lg(P_{out} / P_1)$, где P_{in} и P_{out} - мощности в мВт. Величина IL определяет потери мощности в тестируемом устройстве на конкретной длине волны или в заданном спектральном диапазоне, рис. 9.10. Обычно требуется, чтобы вносимые потери были как можно меньше. На практике значения величины вносимых потерь могут составлять порядка 0,10 дБ и меньше. Для точного измерения вносимых потерь крайне необходим стабильный источник излучения и измеритель мощности с хорошими линейными характеристиками. Отметим также другие важные моменты, на которые следует обратить внимание – это тип волокна, тип источника излучения, способ ввода излучения в волокно, модовые фильтры и зависимость характеристик системы от поляризации.

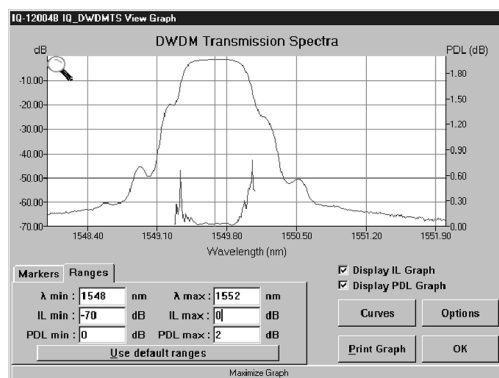


Рис. 9.10 При расчете энергетического потенциала следует учитывать вносимые потери

Компания EXFO располагает широким спектром приборов для ручного и автоматического измерения вносимых потерь с высокой точностью. Мы предлагаем измерительные приборы, как лабораторного типа, так и переносные измерительные приборы модульного типа: светоизлучающие диоды; лазеры с резонатором Фабри-Перо и с распределенной обратной связью; перестраиваемые лазеры, оптимизированные для тестирования пассивных компонентов; одно- и многоканальные измерители оптической мощности.

5. Ширина полосы пропускания. Для определения уровня и положения боковых полос каждого канала в большом динамическом диапазоне используют перестраиваемый источник излучения и измеритель оптической мощности. В данном примере перестраиваемый лазер обеспечивает сканирование заданного спектрального диапазона по длине волны. Измерители оптической мощности с большим динамическим диапазоном одновременно измеряют прошедшую мощность для различных каналов. При соответствующем выборе уровня входной мощности за один цикл сканирования можно измерить в заданном спектральном диапазоне вносимые потери 40 каналов, рис. 9.11.

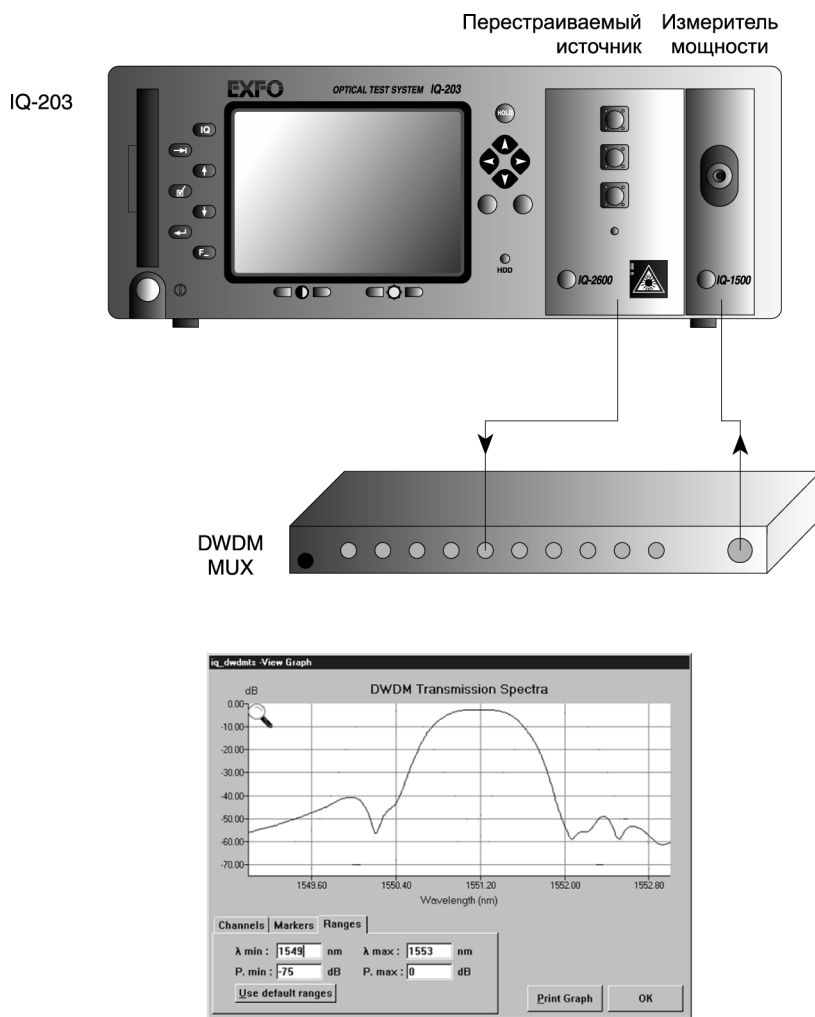


Рис. 9.11 Ширина полосы пропускания является важной характеристикой мультиплексора

6. Направленность/перекрестные помехи входных портов мультиплексора (дБ).

Направленность характеризует способность многопортового устройства подавлять передачу сигнала между входными портами. Как показано на рис. 9.12, направленность определяется уровнем мощности, возвращаемой на другой входной порт. Обычно эта мощность очень мала. На данной установке можно сначала измерить вносимые потери по портам 1 и 2, а затем их взаимную направленность. Применяя трехканальный измеритель мощности, все измерения можно провести без переключения соединений отдельных каналов. Следует отметить, что при измерении направленности важно обеспечить низкий уровень отражения оптического сигнала от выходных торцов неиспользуемых волокон. Если этого не сделать, то отраженный от торцов волокон оптический сигнал возвратится в тестируемый компонент и исказит результаты тестирования.

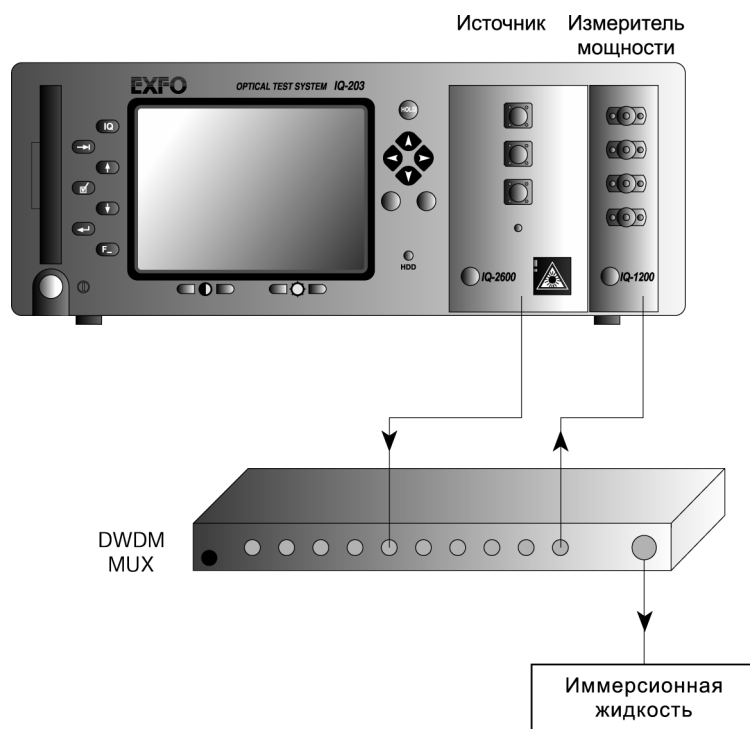


Рис. 9.12 Измерение направленности (волокно с выходного порта мультиплексора помещается в поглощающую жидкость с близким показателем преломления с целью подавления обратного отражения)

7. Потери, зависящие от поляризации PDL (дБ). Потери, зависящие от поляризации, являются мерой чувствительности компонента к состоянию поляризации. Возможному наихудшему случаю воздействия компонента на проходящий сигнал отвечает сложение поляризационных потерь PDL с вносимыми потерями IL. Практически все компоненты конструируются таким образом, чтобы свести поляризационные потери PDL к минимуму, поэтому нередко в спецификациях компонентов можно встретить значения величины PDL порядка 0,05 дБ и меньше. С помощью оборудования компании EXFO измерение поляризационных потерь PDL можно выполнить достаточно быстро и точно. Модульное построение измерительной платформы позволяет обслуживающему персоналу сконфигурировать систему точно в соответствии с требованиями своей измерительной процедуры. В качестве источника может быть выбран светоизлучающий диод, перестраиваемый лазер или другой внешний источник излучения с заданным состоянием поляризации. Контролер поляризации случайным образом изменяет состояния поляризации, и все измерения выполняются в течение время не более пяти секунд, рис. 9.13.

Для измерения поляризационных потерь PDL на такой установке ее калибровка не требуется. При этом измерительная установка не чувствительна к перемещениям волокна.

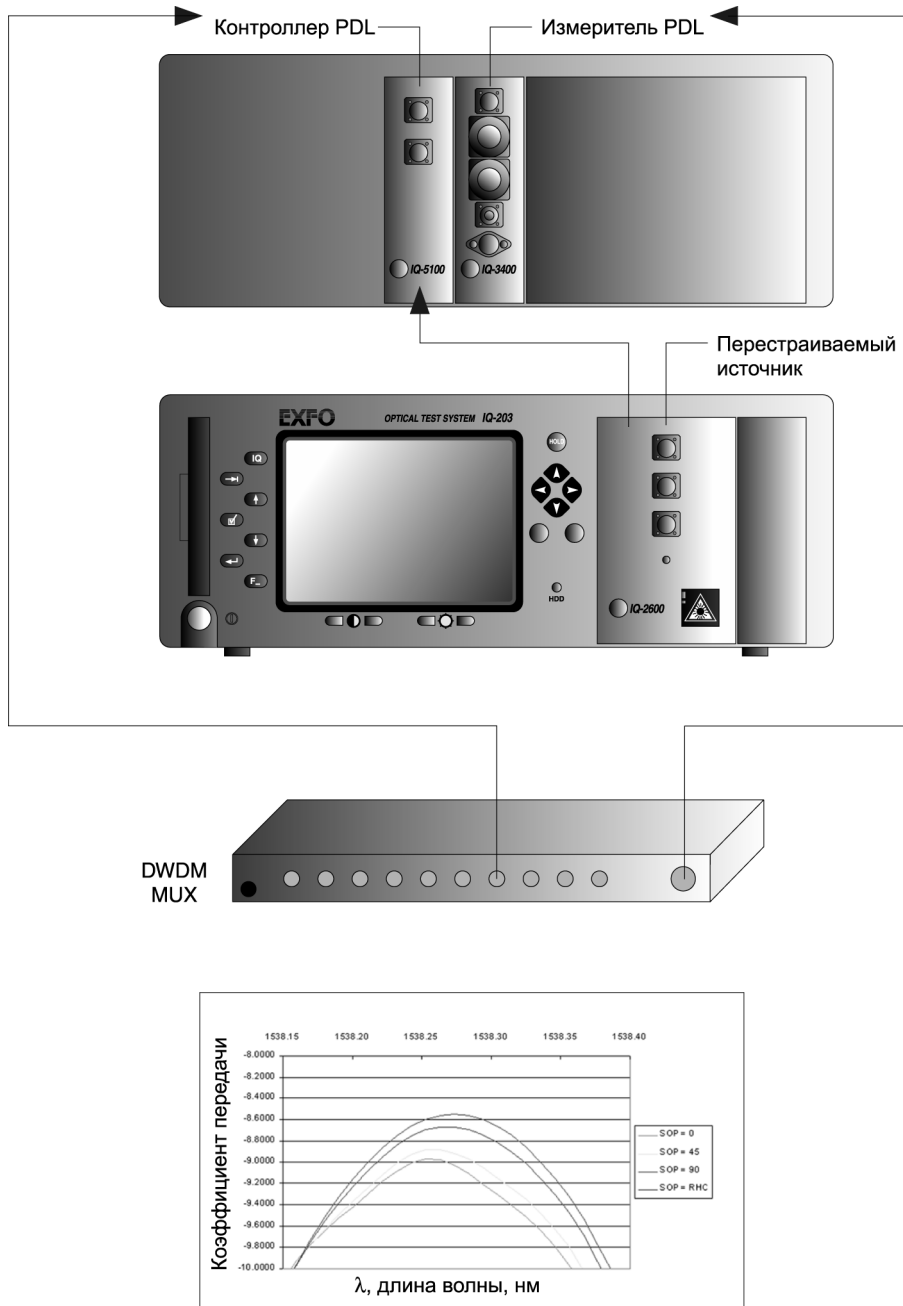


Рис. 9.13 Быстрое и точное измерение поляризационных потерь PDL

8. Потери на отражение (дБ). Потери на отражение ORL является мерой отраженной оптической мощности тестируемым компонентом

$$ORL = 10 \lg(P_{in} / P_{ref})$$

где P_{in} – мощность падающего излучения, P_{ref} – мощность отраженного излучения.

Потери на отражение ORL, равные 0 дБ, соответствует отражению 100% падающего излучения устройством; потери ORL в 20 дБ соответствует отражению в 1%. При разработке большинства пассивных компонентов стремятся минимизировать мощность отраженного излучения, и нередко встречаются компоненты, у которых $ORL > 60$ дБ. При ORL равном 60 дБ отражается лишь 0,0001% оптической мощности. Измерение таких низких уровней отраженной мощности ставит перед производителями измерительной техники сложные и интересные задачи. Для точных и стабильных измерений потерь на отражение необходимо иметь мощный, стабильный и, в идеальном случае, некогерентный источник излучения. Стабильность и высокая мощность необходимы для достижения требуемой чувствительности (80 дБ); во избежание интерференционных явлений важным становится требование степени когерентности источника излучения. Так несоответствующая степень когерентности источника приведет к большому разбросу измеряемых значений ORL. Измеритель потерь на отражение при использовании источника света, оптимизированного для измерений ORL, обеспечивает стабильные измерения значений ORL до уровня 80 дБ. Используя перестраиваемый лазер средней степени когерентности, можно измерять уровень оптических потерь на отражение ORL во всем спектральном диапазоне систем DWDM.

В большинстве случаев измерение уровня оптических потерь на отражение ORL можно автоматизировать и производить достаточно быстро при помощи специализированной измерительной системы для тестирования пассивных компонентов. Система включает широкополосные источники излучения (перестраиваемые и DFB-лазеры), подходящие для всех видов измерений, контролер поляризации, разветвители, переключатели, измеритель поляризационных потерь PDL, а также устройство памяти большого объема для хранения данных, которые используются в дальнейшем для полного анализа результатов измерений.

Мультиплексор, показавший хорошие характеристики при автономном тестировании, будет столь же эффективен и в составе системы. После тестирования всех остальных компонентов и полного тестирования собранной системы WDM на предприятии - изготовителе, она готова для поставки заказчику, который должен выполнить серию собственных испытаний.

9.3 ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

После того как заказчик получит систему, важно выполнить серию испытаний, прежде чем приступать к ее монтажу. Цель такой проверки, удостовериться, что собранные компоненты системы обеспечивают необходимую производительность и удовлетворяют техническим требованиям для ввода в эксплуатацию. В определенных ситуациях различные малые потери, накапливаясь, могут привести к значительным проблемам для системы в целом. Поэтому, далее будут рассмотрены основные процедуры тестирования, которые позволят заказчику определить готовность системы к запуску при условии, что все основные характеристики заданы по максимуму. Это заключительные тесты, выполняемые до начала эксплуатации системы WDM.

После монтажа системы можно тестировать установленное оборудование (источники излучения и мультиплексор). Испытания могут проводиться в чистом или в запыленном помещении, в свободном или очень ограниченном пространстве. Для проведения таких испытаний потребуются переносные приборы с автономным питанием. Должны тестироваться следующие элементы системы:

- оптические передатчики;
- фотоприемники;
- усилители EDFA;
- мультиплексоры/демультиплексоры;
- общая система;
- сигнализация.

Предполагается, что заказчик последует рекомендациям производителя системы WDM и выполнит предложенные тестовые процедуры. Чтобы как-то обрисовать те процедуры, которые должен выполнить заказчик после получения системы, в качестве примера кратко изложим процедуру тестирования важнейших компонентов системы компанией EXFO:

1. **Оптические передатчики.** Мощность и длина волны каждого передатчика должны соответствовать данным, указанным производителем системы, и удовлетворять стандартам ИТУ. Для точного измерения мощности каждого лазера используют измеритель мощности оптического излучения, а для высокоточного измерения длины волны требуется многоволновый измеритель MWM, рис. 9.14.

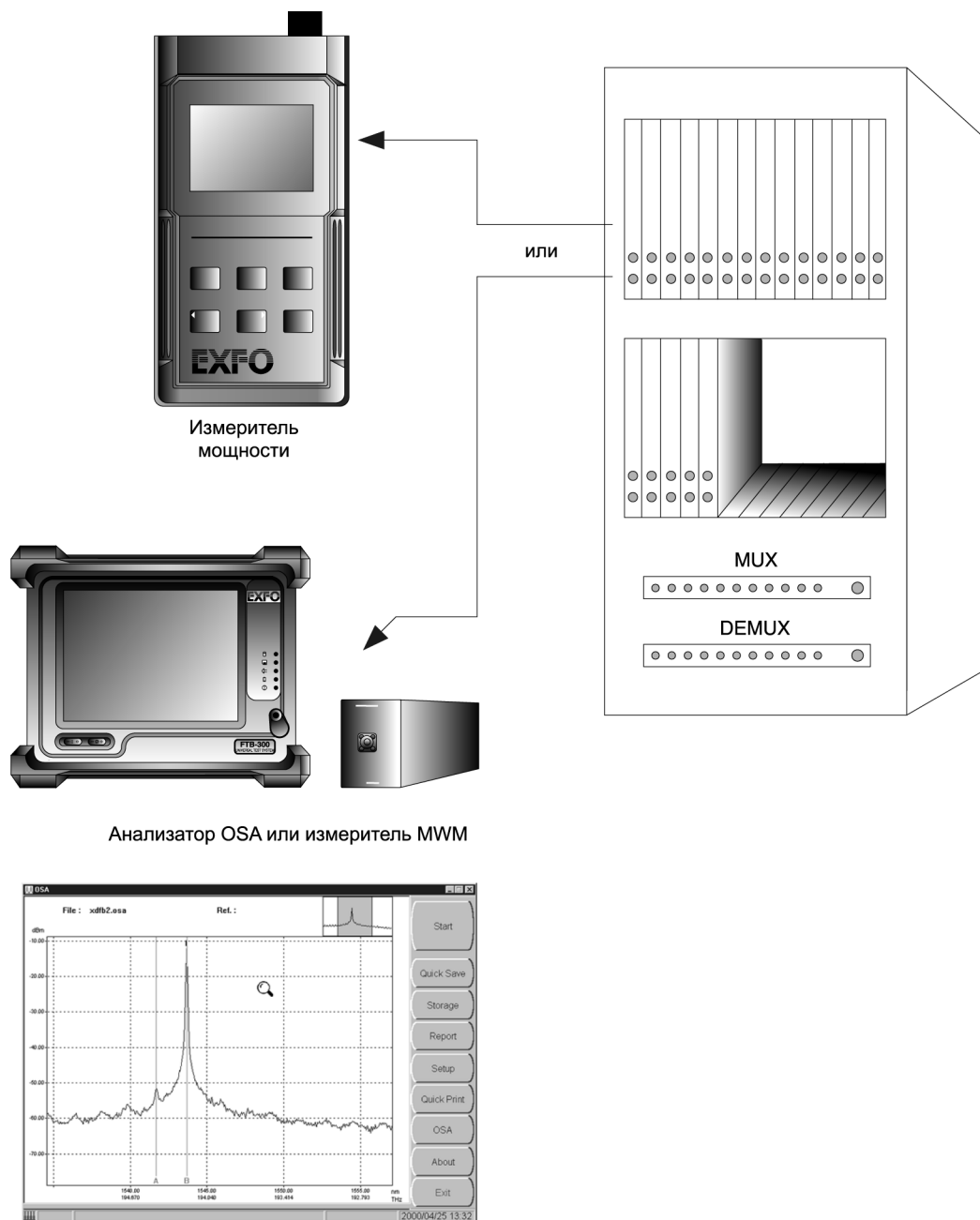


Рис. 9.14 Источник излучения системы тестируют с помощью измерителя мощности излучения и анализатора спектра OSA или многоволнового измерителя MWM

2. Фотоприемники. Следует убедиться, что каждый приемник оптического излучения регистрирует мощность в заданном для него канале, без перекрестных помех от других каналов, рис. 9.15. Необходимо использовать прибор, выполняющий такие измерения в автоматическом режиме. Компания EXFO рекомендует присоединить все источники излучения системы WDM и проводить измерения с помощью анализатора спектра OSA. Затем отключают источник излучения исследуемого канала и измеряют мощность, попадающую от других источников излучения в данный канал.

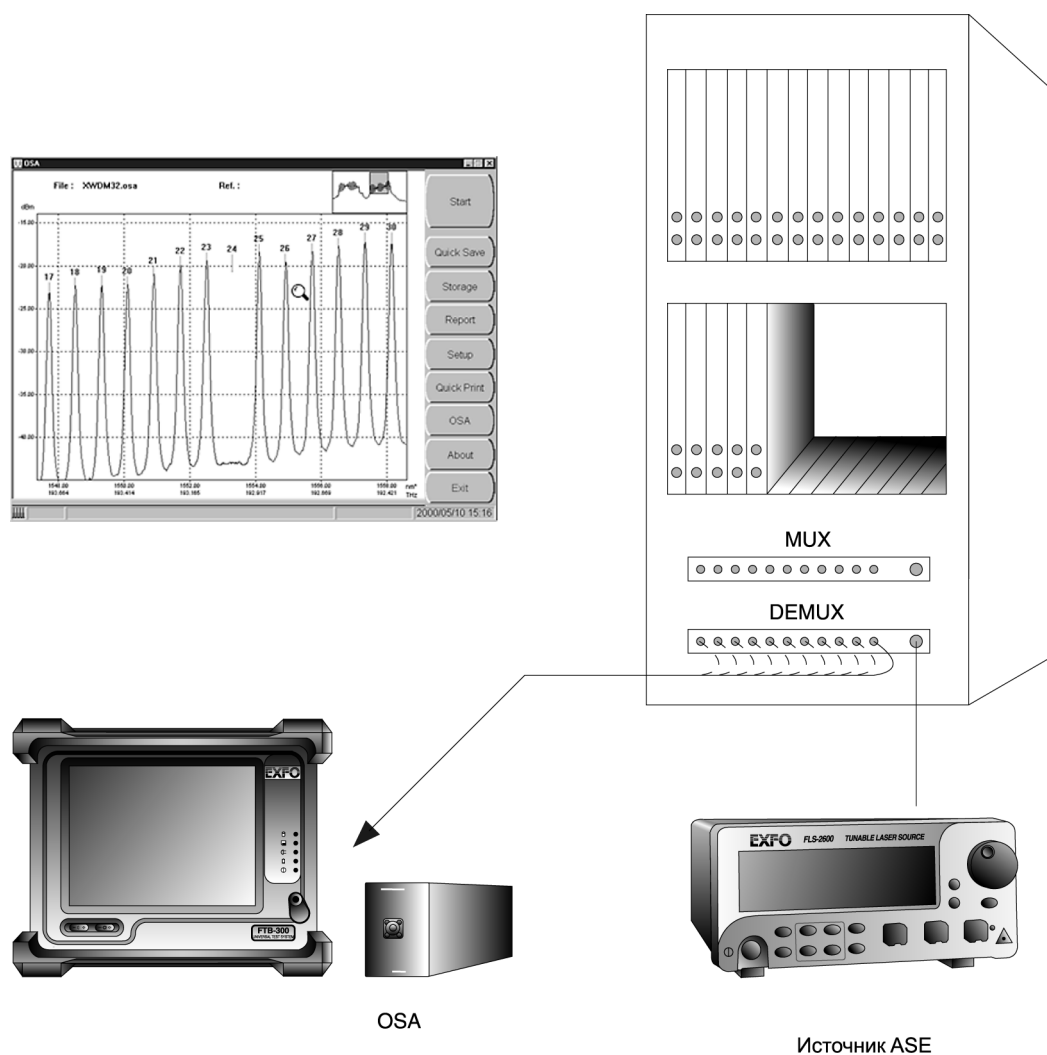


Рис. 9.15 Измерение перекрестных потерь со стороны приемника

3. **Усилитель EDFA.** Выходную мощность усилителя измеряют в режиме насыщения, то есть когда увеличение входной мощности не ведет к росту усиления. Это измерение проводят в области длины волны 1550 нм, используя перестраиваемый источник излучения с регулируемым аттенюатором и калиброванный измеритель мощности оптического излучения, рис. 9.16. Равномерность амплитудно-частотной характеристики усилителя EDFA также исследуют с помощью перестраиваемого источника излучения, который сканирует весь спектральный диапазон усиления, а с помощью анализатора спектра OSA определяют коэффициент усиления для каждой длины волны.

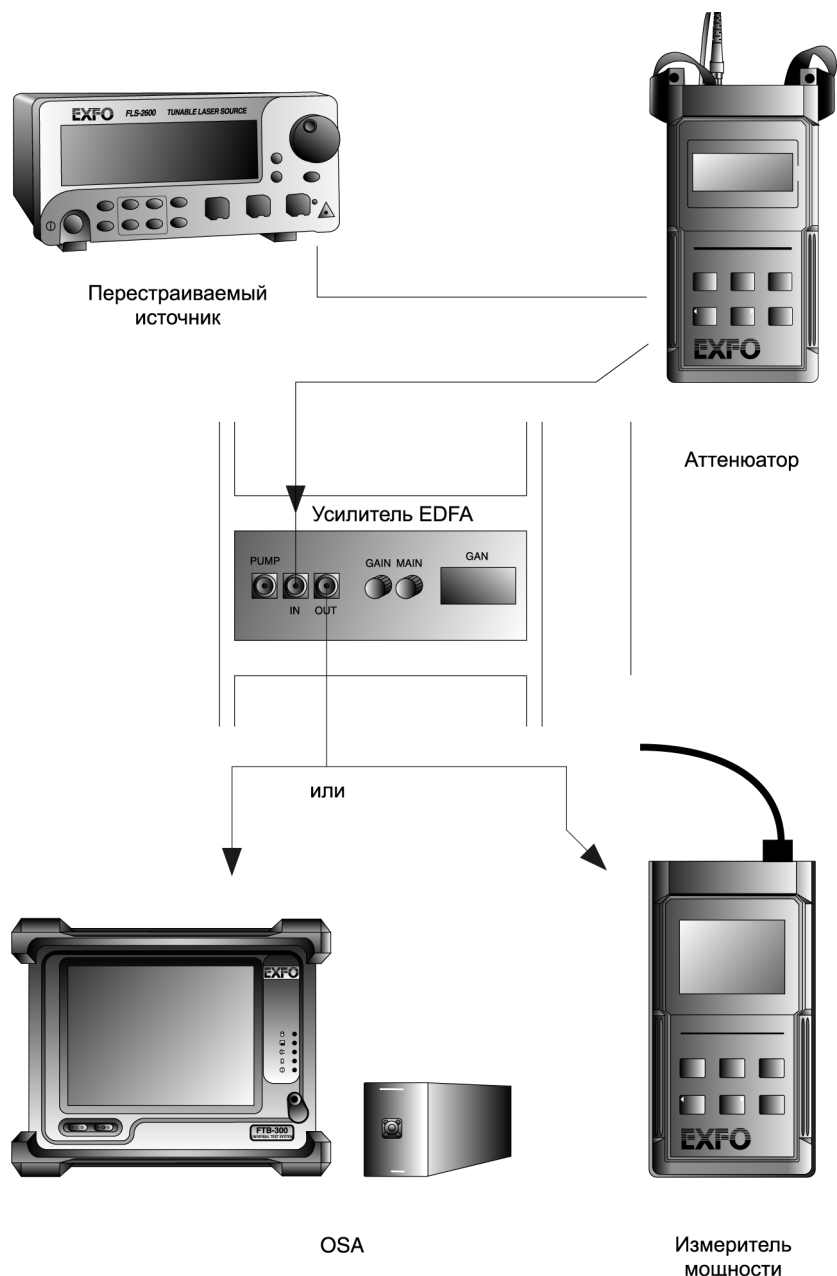
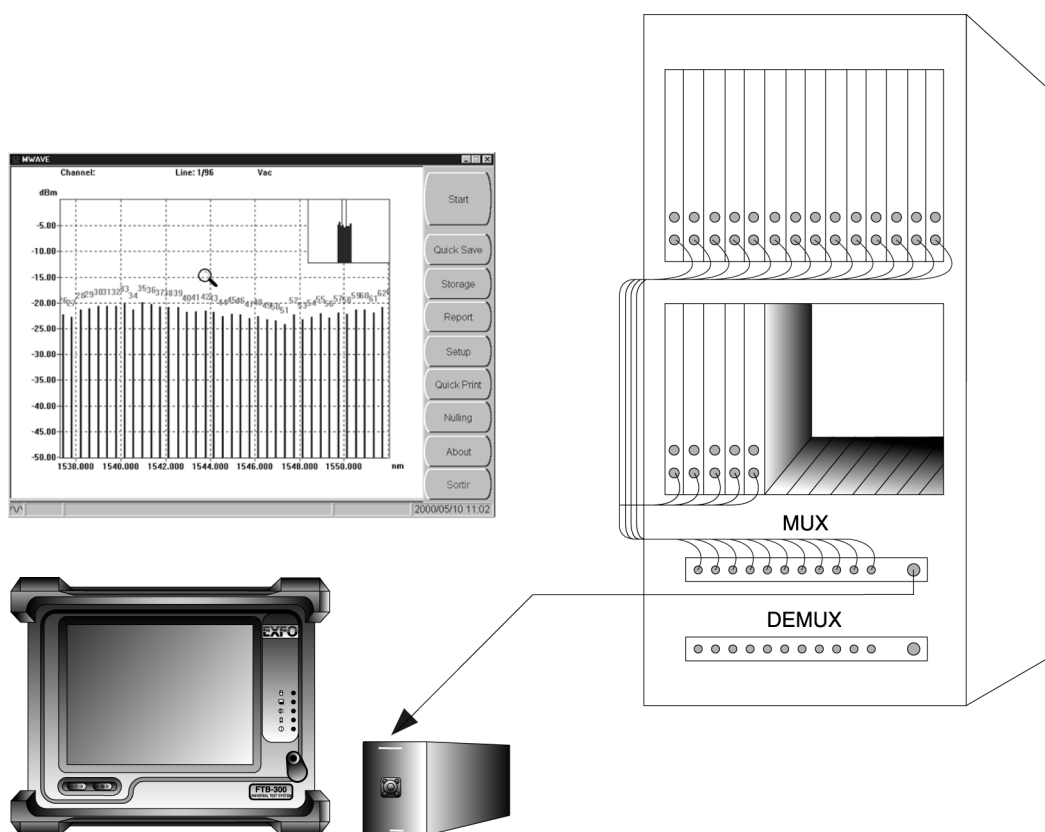


Рис. 9.16 Измерение коэффициента усиления усилителя EDFA

4. Мультиплексор/демультиплексор. Чрезвычайно важно, чтобы все 32 канала мультиплексированного сигнала были стабильны и имели одинаковую мощность непосредственно на входе в волокно. Такое же требование относится к отдельным каналам на выходе демультиплексора. Для проверки равномерности мощности в составных мультиплексных каналах, все источники излучения подключаются к входным портам мультиплексора, а анализатор спектра OSA – а к выходному порту мультиплексора (при тестировании демультиплексора источники излучения попеременно или через оптический переключатель подключаются к входному порту DEMUX, а OSA подключается через переключатель к выходным портам DEMUX). Таким способом можно измерить линейность сигнала.

Далее, используя многоволновой измеритель MWM – следует убедиться, что длины волн соответствуют частотному плану ITU, рис. 9.17. Можно также измерить перекрестные помехи, создаваемые при объединении сигналов в мультиплексоре, используя прежний набор: источники излучения системы WDM и анализатор спектра OSA. И, наконец, измеряются вносимые потери. Для измерений используются все источники излучения и анализатор OSA, который сначала присоединяют к входному порту, а затем к выходному порту мультиплексора. С помощью анализатора производится вычитание одного спектра из другого, и получают спектральную зависимость вносимых потерь.



Анализатор OSA или многоволновой измеритель MWM

Рис. 9.17 Многоволновой измеритель MWM обеспечивает точное измерение длины волны

5. Общая система. К выполнению тестов системы в целом приступают, когда в работе системы задействованы все новые компоненты. Для выполнения этих тестов анализатор спектра OSA подсоединяют к каждому порту системы и проводят измерение отношения сигнал/шум для оптического сигнала каждого канала. В зависимости от технических требований производителя системы и от места проведения тестов, значения отношения сигнал/шум могут меняться от 18 дБ на удаленном конце волокна системы, до 40 дБ в ее начале. При проведении измерений характеристик усилителя EDFA необходимо выбрать уровень усиления в зависимости от типа усилителя. И, наконец, рекомендуется выполнить тест на долговременную стабильность канала. Используя мнговолновой измеритель MWM в режиме длительного мониторинга (drift mode), обслуживающий персонал может проследить за смещением длины волны в системе WDM с чрезвычайно высокой точностью.

6. Сигналы тревоги. Чтобы проверить готовность к работе всех видов сигналов тревоги системы, достаточно поочередно отсоединять каждый компонент системы (источники, мультиплексор, демультимплексор, усилитель, лазер накачки, детектор) и наблюдать появление соответствующего сообщения.

9.4 МОНИТОРИНГ

9.4.1 Общий обзор

Основная идея мониторинга проста. Блоки дистанционного тестирования RTU (Remote Test Unit), интеллектуальность которых повышается за счет PC-совместимой архитектуры, располагаются в стратегических точках волоконно-оптической сети, охватывая как можно большую ее часть.

В состав блоков RTU входит мощный рефлектометр OTDR и оптический переключатель, позволяющий максимально полно использовать рефлектометр. Рефлектометр ведет непрерывный (либо по заданной схеме) мониторинг каждого волокна, подключенного к разъему оптического переключателя, и постоянно сравнивает получаемые данные с эталонной рефлектограммой для каждого волокна. Если какое-либо измерение рефлектометра выходит за пороговые значения, заранее установленные для каждого волокна, автоматически генерируется сигнал тревоги. Этот сигнал обычно содержит дату и время возникновения неисправности, измеренное рефлектометром оптическое расстояние до нее, величину потерь, номер неисправного кабеля и волокна, центральный узел и т. д.

Блоки дистанционного тестирования RTU, расположенные в специально выбранных точках сети, посылают сообщения на центральную станцию/сервер, называемую также контроллером системы управления TSC (Test System Controller) (рис. 9.18). Вся пришедшая от TSC информация сохраняется в реляционной базе данных, обрабатывается и в дальнейшем доступна через все типы запросов SQL. Контроллер TSC также осуществляет все функции связи с блоками RTU, рабочими станциями и станциями контроля сети, где бы они не находились.



Рис. 9.18 Структура системы дистанционного тестирования волокон RFTS

Обнаружение неисправностей

Именно в решении данной задачи и проявляются главные достоинства системы дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System). В программное обеспечение центральной станции RFTS входит мощная геоинформационная система (GeoMedia или Small World). С ее помощью можно создать карту своей волоконно-оптической сети и линии связи, содержащую такую информацию как:

- тип волокна;
- производитель;
- тип соединителей;
- дата монтажа;
- расположение узлов сети;
- номера волокон;
- резервные волокна;
- пользователи и т. д.

На карту сети наносятся также точки привязки к местности (реперы) – люки, центральные узлы, башни и т. д., с указанием их точного местоположения в координатах GPS (или любых других).

Для каждого участка сети между парой реперов система RFTS вычисляет коэффициент соответствия оптической и физической длины волокон. Он позволяет системе автоматически определять реальное физическое положение неисправности на основе измеренной рефлектометром оптической длины волокна до нее.

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

Оптическая длина может сильно отличаться от физической длины по многим причинам:

- излишки волокна, оставленные в люках или на стойках;
- изгибы кабеля вдоль улиц;
- разница высот (горы, холмы и т. д.);
- коэффициент скрутки волокна.

9.4.2 Подключение и работа системы

Практический мониторинг

- Установите RTU (в стойку RFTS) и подсоедините все тестируемые волокна к оптическому переключателю, рис.9.19. Эти волокна могут быть как рабочими, так и “темными” (неиспользуемыми).

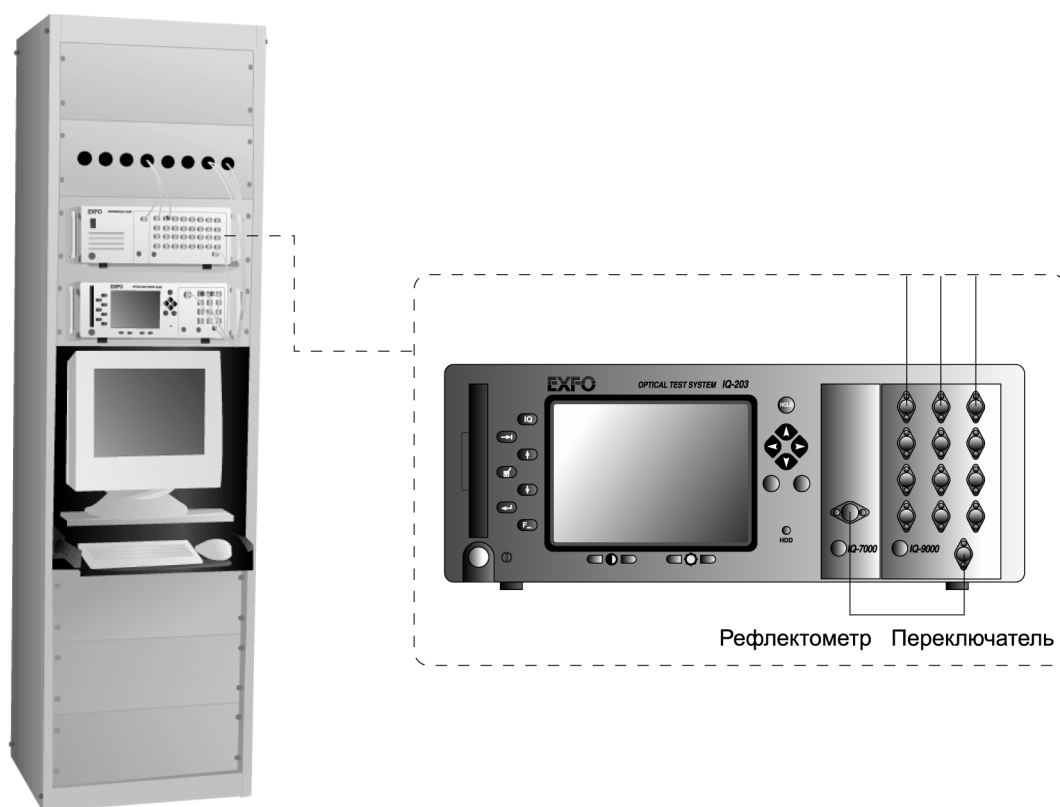


Рис. 9.19 Основным измерительным прибором в системе RFTS является рефлектометр OTDR

- Подсоединяя рефлектометр через оптический переключатель к каждому тестируемому волокну, получите рефлектограммы и сохраните их в качестве эталона, рис.9.20. Эталонные рефлектограммы используются при последующих сравнениях; устанавливая пороги, верхние и нижние пределы допустимых значений, оператор задает условия подачи сигналов тревоги различной степени важности (второстепенные, основные, аварийные и т.д.), рис. 9.21. Эти пороги можно устанавливать для случаев:
 - полной потери мощности в канале связи;
 - деградации событий вследствие отражения;
 - деградации событий, не связанных с отражением;
 - затухания на участке;
 - обнаружения нового события;
 - деградации начального уровня и т.д.

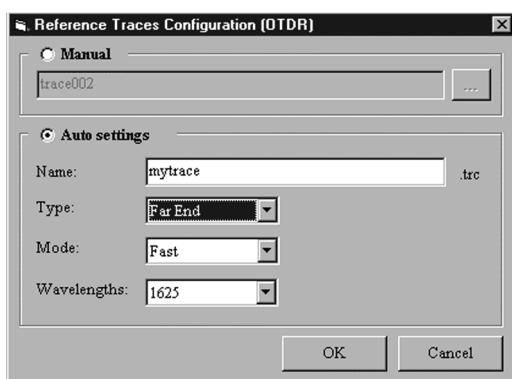


Рис. 9.20 Эталонная рефлектограмма является основой сравнительного анализа

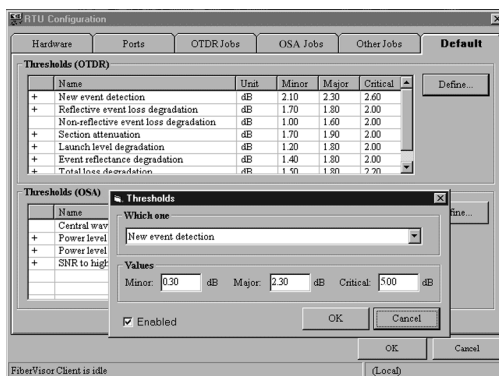


Рис. 9.21 Задание пределов изменения параметров системы

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

- Введите последовательность обхода тестируемых волокон, рис. 9.22:
 - порт 1;
 - порт 12;
 - порт 42;
 - порт 13;
 - ...

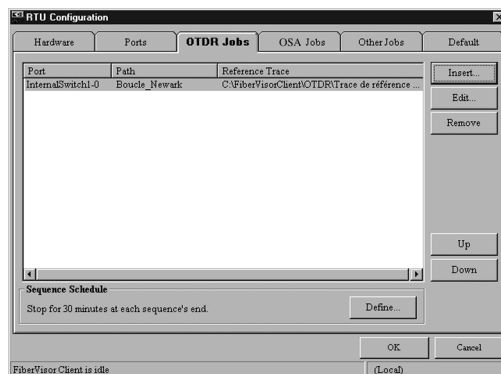


Рис. 9.22 Выбор последовательности мониторинга

- Укажите интервал (если необходимо) между циклами мониторинга, рис. 9.23.
- Начните мониторинг.

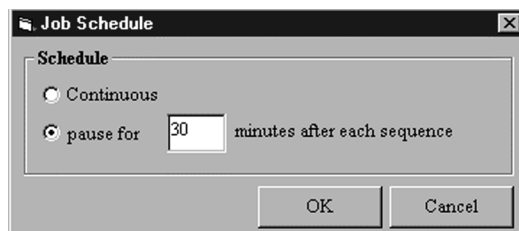


Рис. 9.23 Задание временного интервала между циклами мониторинга

Мониторинг спектра

- Установите RTU (в стойку RFTS) и присоедините все тестируемые волокна к оптическому переключателю. Эти волокна должны быть рабочими.
- Подсоединяя анализатор спектра через оптический переключатель к каждому тестируемому волокну, получите спектрограммы и сохраните их в качестве эталона, рис. 9.24. Эталоны спектрограмм используются в последующих сравнениях; устанавливая верхние и нижние пределы допустимых значений, оператор задает условия подачи сигналов тревоги различной степени важности (второстепенные, основные, аварийные и т.д.), рис. 9.25. Эти пороги можно устанавливать для случаев:
 - смещения центральной длины волны;
 - отношения сигнал/шум;
 - мощности сигнала.

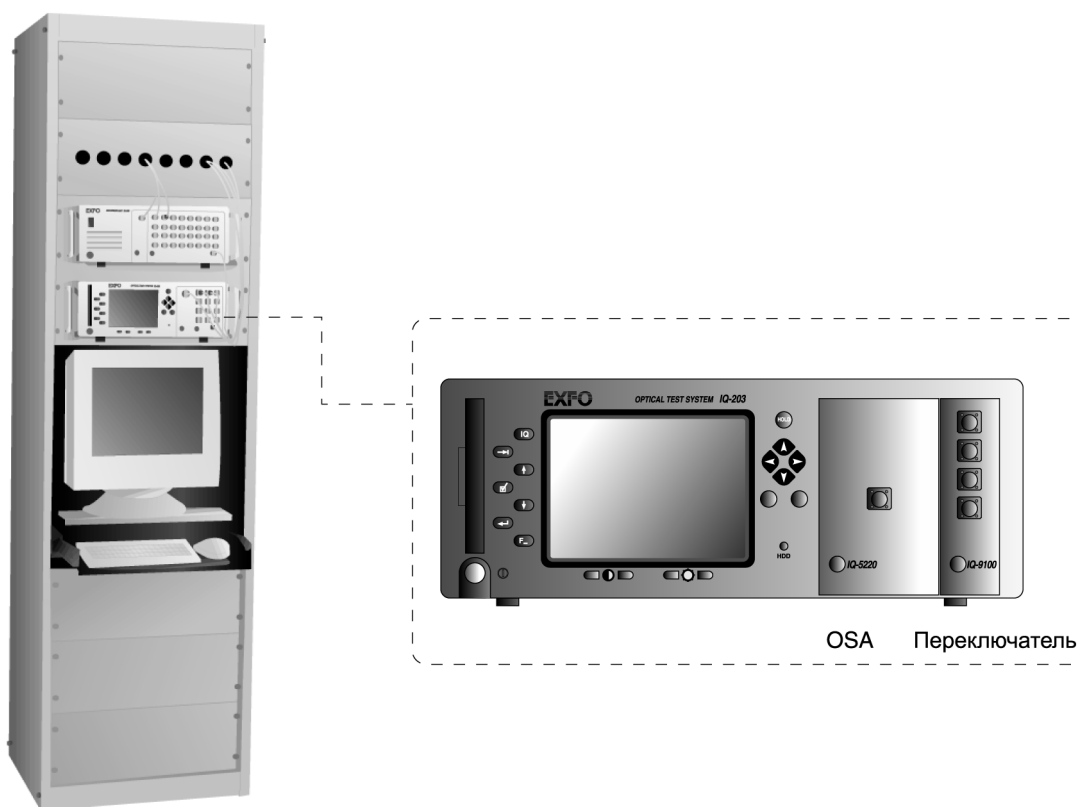


Рис. 9.24 В системе RFTS возможно применение анализатора спектра OSA

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ EXFO ПО ТЕСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ WDM

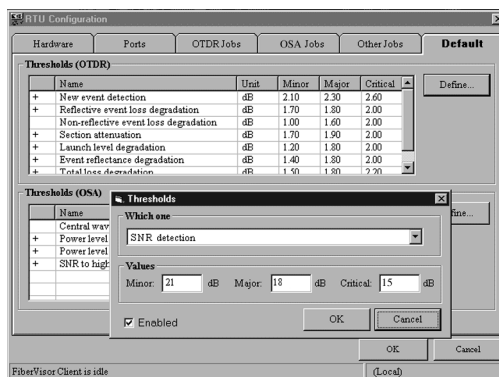


Рис. 9.25 Определение спектрального диапазона системы

- Введите последовательность обхода тестируемых волокон, рис. 9.26:
 - порт 1;
 - порт 12;
 - порт 42;
 - порт 13;
 - ...

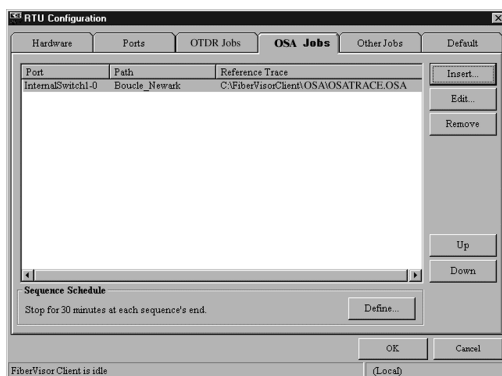


Рис. 9.26 Порядок мониторинга с применением анализатора спектра OSA отличается от случая применения рефлектометра

- Укажите интервал (если необходимо) между циклами мониторинга.
- Начните мониторинг.

9.5 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ

По всей видимости, каждый оператор связи имеет свой собственный план по техническому обслуживанию системы. Как количество, так и состав тестов, выполняемых в ходе текущей поддержки, может меняться со временем. На самом деле техническое обслуживание очень похоже на этап ввода системы в эксплуатацию. Единственное отличие состоит в том, что оно растягивается на период от шести месяцев до двух лет. В этот период тестирование основных характеристик системы выполняется чаще, чем второстепенных.

Сроки технического обслуживания можно варьировать в зависимости от степени ухода важнейших характеристик системы от их исходных значений. Такие смещения могут быть обнаружены в том случае, если ведется текущий контроль характеристик. Когда в системе появляется отказ и начинается поиск неисправностей, то измерения в основном производятся на неисправном компоненте. Можно повторить все те тесты, которые выполнялись при вводе системы в эксплуатацию, либо следовать специальным процедурам, рекомендованным производителем на этот случай.

Состав тестового оборудования, необходимого для технического обслуживания, тот же что и при вводе системы в эксплуатацию. Однако персоналу, отвечающему за техническое обслуживание, необходимо перемещаться из одного пункта (или помещения) в другой, поэтому измерительный прибор должен быть портативным и защищенным, чтобы выдерживать транспортировку без последующей калибровки. Сроки тестирования, предлагаемые компанией EXFO, учитывают важность компонентов системы и качество оптической передачи:

- тестирование сигналов тревоги каждые четыре месяца;
- тестирование усилителей EDFA и системы в целом каждые 6 или 8 месяцев;
- тестирование мультиплексора/демультиплексора каждые 12 месяцев;
- тестирование источника и приемника каждые 16-18 месяцев.

Будем надеяться, что поиск неисправностей займет у вас небольшую часть времени, отводимого на работу с системой!

РУКОВОДСТВО W D M

ГЛОССАРИЙ

СОКРАЩЕНИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГЛОССАРИЙ

C-диапазон (основной)

C-band (conventional band)

Спектральное окно длин волн от 1525 нм до 1565 нм, соответствующее диапазону сильного усиления в кварцевом волокне, легированном ионами эрбия. См. в приложении таблицу "Спектральные диапазоны стандарта ITU".

DFB-лазер

DFB laser

См. Лазер с распределенной обратной связью.

DSn (альтернатива En)

DSn

Физические интерфейсы плезиохронной цифровой иерархии с различными скоростями, используемой в Северной Америке. Канал DS1 обеспечивает передачу со скоростью 1,544 Мбит/с и содержит 24 канала DS0 со скоростями 64 Кбит/с. DS3 состоит из семи каналов DS2 (DS2 из четырех DS1), которые мультиплексируются и передаются со скоростью 44,736 Мбит/с. В Европе используются другие интерфейсы - En (из них E1 и E3 получили наибольшее распространение)

FP-лазер

FP laser

См. Лазер с резонатором Фабри-Перо.

L-диапазон

L-band (long band)

Спектральный диапазон от 1568 нм до 1610 нм. См. в приложении таблицу "Спектральные диапазоны стандарта ITU".

Амплитудная модуляция

Amplitude modulation (AM)

Технология передачи, использующая кодирование информации посредством изменения амплитуды несущего сигнала.

Архитектура сети

Network architecture

Концепция взаимосвязи компонентов сети, включающая совокупность принципов логической и физической организации структуры сети, а так же принципы функционирования технических и программных средств; определяет протоколы и интерфейсы сети.

Аттенюатор

Attenuator

Оптическое устройство для регулирования (уменьшения) интенсивности проходящего через него оптического излучения.

Ближние перекрестные помехи

Near-End Crosstalk

См. Направленность.

ГЛОССАРИЙ

Бриллюэновское рассеяние

Brillouin scattering (BS)

При вынужденном Бриллюэновском рассеянии, которое называют также рассеянием Мандельштама – Бриллюэна, луч лазера создает периодические области с переменным коэффициентом преломления, т.е. дифракционную решетку, на которой значительная часть его световой энергии рассеивается назад.

Вносимые потери

Insertion loss (IL)

Потери оптической энергии, возникающие из-за вставки некоторого компонента или устройства.

Волноводная дисперсия

Waveguide dispersion

Расплывание формы оптического импульса, обусловленное зависимостью фазовой и групповой скорости от длины волны в оптическом волноводе.

Волновое мультиплексирование

Wavelength-division multiplexing (WDM)

Технология передачи в оптических системах с разными длинами волн, когда два и более оптических сигнала объединяются и передаются по одному общему оптическому пути.

Волновой измеритель

Wavelength Meter

Прибор для точного измерения длины волны излучения. Интерферометрический анализ позволяет очень точно определить относительную длину волны, а привязка к абсолютному значению осуществляется при помощи эталонного HeNe лазерного источника.

Волокно со ступенчатым профилем показателя преломления

Step-index fiber

Волокно с однородным показателем преломления сердцевины и более низким показателем преломления оболочки.

Волокно, градиентное

Graded index fiber

См. Градиентное волокно.

Волокно, многомодовое

Multimode fiber

См. Многомодовое волокно.

Волокно, одномодовое

Singlemode fiber

См. Одномодовое волокно.

Волокно, оптическое

Optical fiber

См. Оптическое волокно.

Волокно, ступенчатое

Step-index fiber

См. Ступенчатое волокно.

Волоконная брэгговская решетка

Fiber Bragg grating

Оптический элемент, основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевины или оболочки оптического волокна. Это основной элемент в таких устройствах как оптический мультиплексор, компенсатор дисперсии и усилитель EDFA с равномерным коэффициентом усиления.

Воспроизводимость

Repeatability

Определяется как разброс измеряемой величины. Перед измерением следует устанавливать одни и те же условия измерения, которые могли измениться после предыдущего измерения.

Временное мультиплексирование

Time-division multiplexing (TDM)

Технология цифровой передачи, использующая временное уплотнение каналов для передачи данных и голоса.

Вынужденное рамановское рассеяние (вынужденное комбинационное рассеяние)

Stimulated Raman scattering

Явление рассеяния когерентного излучения лазера на молекулярных колебаниях в волокне (оптических фононах) со смещением в область более длинных волн. В WDM-системах данное явление служит механизмом переноса мощности от коротковолновых каналов к длинноволновым.

Глобальная сеть передачи данных

Wide area network (WAN)

Сеть, объединяющая различных пользователей в большой географической зоне, превышающей масштабы города, страны.

Городская АТС (ГАТС)

Central office (CO)

См. Центральный узел.

Городская сеть

Metropolitan area network (MAN)

Протяженная *сеть передачи данных* городского/регионального масштаба. (Сеть MAN обеспечивает передачу данных на расстояния порядка 50 км обычно по стандарту IEEE 802.6 MAN).

Градиентное волокно

Graded index fiber

Оптическое волокно с сердцевиной, у которой показатель преломления плавно уменьшается от центра к краю. Обычно применяется в многомодовых волокнах.

Дальние перекрестные помехи

Far-End Crosstalk

См. Изоляция.

ГЛОССАРИЙ

дБм

dBm

Относительная оптическая мощность по отношению к уровню мощности в 1 мВт.

Двойное лучепреломление

Birefringence

Физическая асимметрия показателя преломления материала для разных поляризаций света, из-за которой скорость распространения света в данном материале зависит от состояния его поляризации (ориентации электрического вектора световой волны).

Демультимплексор

Demultiplexer (DEMUX)

Выделяет N разных каналов (длин волн) из одного сигнала.

Детектор

Detector

Устройство, преобразующее энергию оптического излучения в электрический сигнал приемника.

децибел (дБ)

Decibel (dB)

Стандартная логарифмическая единица для выражения отношения двух величин. В волоконной оптике отношение значений оптической мощности указывает на ее потерю или усиление.

Диаметр модового пятна

Mode field diameter (MFD)

Характерный поперечный размер области локализации поля основной моды оптического волокна, в котором сосредоточена основная доля оптической мощности.

Диапазон измерений

Measurement range

Разность между уровнем исходного сигнала на входе в тестируемое волокно и минимальным уровнем сигнала, при котором событие можно точно идентифицировать и измерить с заданной точностью.

Динамический диапазон

Dynamic range

Динамический диапазон оптических приборов обычно определяется как отношение (в дБ) наименьшего сигнала, наблюдаемого (при заданном спектральном разнесении) в присутствии сильного, близкого к насыщению сигнала.

Диод, светоизлучающий

Light-emitting diode (LED)

См. Светодиод.

Дисперсия, модовая

Dispersion

См. Модовая дисперсия/

Дисперсия, хроматическая
Chromatic dispersion

См. Хроматическая дисперсия.

Дифракционная решетка
Diffraction grating

Оптический элемент с периодической структурой, отражающий (или пропускающий) свет под одним или несколькими разными углами, зависящими от длины волны. Основу составляют периодически повторяющиеся изменения показателя преломления или отражения на которых и происходит когерентное рассеяние света (отражение или пропускание).

Дифференциальная групповая задержка
Differential group delay (DGD)

Существуют два взаимно ортогональных состояния поляризации на входе в волокно. Они также называются *основными состояниями поляризации*, одно из которых соответствует большей, а другое меньшей групповой скорости распространения светового импульса в волокне. Разность времен распространения для этих скоростей и называется дифференциальной групповой задержкой (DGD).

Длина волны отсечки
Cutoff wavelength

Наименьшая длина волны, на которой сигнал еще может распространяться в оптическом волокне (для основной поперечной моды световой волны).

Длина волны спектрального максимума
Peak wavelength

Длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной рабочей характеристики (например, длина волны спектрального максимума оптического источника, полосы пропускания фильтра и т.д.).

Длина волны, номинальная
Nominal wavelength

См. Номинальная длина волны.

Длина волны, центральная
Central wavelength

См. Центральная длина волны.

Длина волны, центральная, зависящая от поляризации
Polarization dependent central wavelength (PDCW)

См. Зависимая от поляризации центральная длина волны.

Зависимая от поляризации центральная длина волны
Polarization dependent central wavelength (PDCW)

Зависимость центральной длины волны проходящего или отраженного света от состояния поляризации падающего света.

Замедление
Retardation

Разность фаз для светового пучка распространяющегося вдоль медленной и быстрой осей в двулучепреломляющем материале замедляющей пластины.

ГЛОССАРИЙ

Замедляющая пластина

Retardation plate

Оптический двулучепреломляющий компонент в виде пластины. Падающий на пластину поляризованный пучок разделяется на два пучка, поляризованные в перпендикулярных плоскостях. На выходе эти пучки вновь объединяются в один поляризованный пучок. Замедляющая пластина создает замедление на длину волны, половину и четверть длины волны.

Затухание

Attenuation

Снижение средней оптической мощности вследствие поглощения, рассеяния и других процессов. Затухание обычно выражают в дБ.

Защитное покрытие

Buffer coating

Защитный материал, покрывающий и предохраняющий волокно от внешних воздействий. Покрытие не выполняет никаких оптических функций.

Измеритель обратного отражения

Optical continuous wave reflectometer (OCWR)

Прибор для измерения полного обратного отраженного сигнала, распространяющегося по волокну обратно к источнику излучения. OCWR используют для измерения потерь на отражение различных оптических компонентов.

Измеритель оптических потерь

Optical loss test set (OLTS)

Прибор для измерения полных потерь в оптическом волокне. В его состав входят оптический источник и измеритель мощности оптического излучения либо по отдельности, либо объединенные в одну измерительную систему.

Измерительная система

Test System

Набор измерительных приборов, собранных в вместе

Изоляция канала

Channel isolation

Относительная мощность паразитных сигналов (на других длинах волн) в оптическом канале. (См. *дальние перекрестные помехи, FEXT*).

Изоляция, (дальние перекрестные помехи, FEXT)

Isolation

Отношение входной мощности излучения для данного канала, к паразитной мощности на длине данного канала, утекающей через другие выходные порты многопортового устройства (например, разветвителя).

Иммерсионный гель

Index-matching gel

Материал, *показатель преломления* которого практически равен показателю преломления *сердцевины* волокна. Используется для уменьшения *френелевского отражения*.

Институт инженеров электротехники и электроники

IEEE

Профессиональная организация, активно занимающаяся исследованиями в области волоконной оптики и оптической электроники, наряду с другими многочисленными направлениями.

Интерферометр Маха-Цендера

Mach-Zehnder interferometer

Оптическое устройство, делящее оптический сигнал на два пространственных пучка с различными оптическими путями, и объединяющее их на выходе в общий сигнал. После объединения этих двух пучков происходит их интерференция.

Источник

Source

Светоизлучающий или лазерный диод, излучение которого вводится в оптическое волокно.

Канальный интервал

Channel spacing

Расстояние между соседними каналами (по длине волны или частоте).

Когерентность

Coherence

Явление согласования фаз фотонов (или компонентов волновых пакетов) в световом пучке. Чем выше когерентность, тем уже ширина линии излучения (лазера).

Коннектор

Connector

См. Разъем.

Контролер поляризации

Polarization controller

Устройство, преобразующее входное состояние поляризации (SOP) светового пучка в другое регулируемое выходное состояние поляризации.

Коэффициент отражения

Reflectance

Отношение мощности отраженного света к мощности падающего в какой-то одной точке отражения или от компонента.

Коэффициент ошибок (вероятность ошибки)

Bit error rate (BER)

Отношение числа неверно принятых битов к полному числу переданных битов при передаче по каналу связи. В современных сетях связи характерные значения BER - 10^{-9} и лучше.

Лавинный фотодиод

Avalanche photodiode (APD)

Фотодиод с лавинным фотоумножением первичного фототока.

ГЛОССАРИЙ

Лазер

Laser

Сокращение от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света посредством стимулированной эмиссии излучения). Благодаря стимулированной эмиссии лазер является источником света с высокой степенью когерентности. Полупроводниковые лазеры нашли широкое применение в волоконно-оптических линиях связи.

Лазер с распределенной обратной связью

Distributed feedback laser (DFB laser)

Инжекционный лазерный диод с отражательной брэгговской решеткой.

Лазер с резонатором Фабри-Перо

Fabry-Perot (FP) laser

Лазер, имеющий в качестве резонатора два плоских зеркала и допускающий как одномодовый, так и многомодовый режим излучения.

Лазер, перестраиваемый

Tunable laser

См. Перестраиваемый лазер.

Линейность

Linearity

Линейность (измерительного прибора) характеризует отклонение измеренного значения от среднего ожидаемого значения.

Линия

Trunk

Выделенная линия связи между двумя узлами сети.

Локальная сеть передачи данных

Local area network (LAN)

Сеть, объединяющая пользователей в локально ограниченной области. Сеть включает такие элементы, как: серверы, рабочие станции, сетевая операционная система и каналы связи.

Магистраль

Backbone

Транспортная сеть или линия связи транспортной сети

Макроизгиб

Macrobending

Искривление оси волокна, вызывающее потери света.

Материальная дисперсия среды

Material dispersion

Дисперсия оптического сигнала, вызываемая зависимостью показателя преломления материала сердцевины оптического волокна от длины волны.

Международный союз телекоммуникаций

International Telecommunication Union (ITU)

Организация разрабатывает международные стандарты для телекоммуникаций и документацию многих сетевых стандартов.

Микроизгиб

Microbending

Микроскопические изгибы оси волокна. Они приводят к потерям света в волокне вследствие рассеяния и выхода части излучения из сердцевины в оболочку.

Многолучевая интерференция

Multipath interference (MPI)

Интерференция, возникающая вследствие множественных отражений светового пучка при его распространении вдоль оптического пути системы. Приводит к размыванию оптического импульса и снижению характеристик системы.

Многомодовое волокно

Multimode fiber

Оптическое волокно, поддерживающее распространение многих пространственных мод.

Мода

Mode

Тип волны в волокне.

Модовая дисперсия

Dispersion

Зависимость скорости распространения сигнала от различных модовых составляющих в оптическом волокне. Приводит к уширению начального оптического импульса по мере его распространения и ограничивает ширину полосы пропускания волокна.

Модовый фильтр

Mode stripper

Устройство, используемое для полного подавления мод излучения, распространяющихся в оболочке оптического волокна.

Модуляция, амплитудная

Amplitude modulation (AM)

См. Амплитудная модуляция.

Модуляция, частотная

Frequency modulation (FM)

См. Частотная модуляция.

Мощность опорного сигнала

Reference power

Уровень мощности, устанавливаемый в качестве исходного уровня. При измерении потерь опорным уровнем является уровень мощности источника света.

Мультиплексирование, волновое

Wavelength-division multiplexing (WDM)

См. Волновое мультиплексирование.

Мультиплексирование, временное

Time-division multiplexing (TDM)

См. Временное мультиплексирование.

ГЛОССАРИЙ

Мультиплексирование, плотное волновое

Dense wavelength-division multiplexing (DWDM)

См. Плотное волновое мультиплексирование.

Мультиплексирование, узкозонное волновое

Narrowband wavelength-division multiplexing (NBWDM)

См. Узкозонное волновое мультиплексирование.

Мультиплексор

Multiplexer (MUX)

Устройство, объединяющее несколько разных сигналов (обычно с разными длинами волн) в одном волокне.

Мультиплексор ввода/вывода

Add/drop multiplexer (ADM)

Устройство, используемое для объединения низкоскоростных электрических и/или оптических каналов в высокоскоростной оптический канал и наоборот. Мультиплексор ввода/вывода обеспечивает временное мультиплексирование (TDM), либо плотное волновое мультиплексирование (DWDM) и позволяет объединять отдельные каналы в магистральных линиях связи.

Накрутка на стержень

Mandreling

Накрутка оптического волокна на цилиндр с заданным радиусом с целью внести изменения в характер распространения света в волокне (например, к потерям на макроизгибах в одномодовом волокне, смешиванию мод в многомодовом волокне).

Направленность, (ближние перекрестные помехи, NEXT)

Directivity

Отношение выходной мощности излучения для данного порта (выхода), к паразитной мощности, утекающей через другие выходные порты многопортового устройства (например, разветвителя).

Национальный институт стандартов и технологий

National Institute of Standards and Technology (NIST)

Американский национальный институт стандартизации, занимающийся разработкой стандартов в различных отраслях промышленности, в том числе, в волоконной оптике.

Неисправность

Fault

Прерывание в работе сети.

Неравномерность пика

Ripple

Искажения (отклонения) формы параметрической кривой от гладкой, симметричной формы.

Номинальная длина волны

Nominal wavelength

Заданное значение длины волны, характеризующее конкретное оптическое устройство (например, фильтр, лазер). Оно не обязательно совпадает с истинным значением длины волны из-за ошибок измерения или неточностей изготовления.

Оболочка

Cladding

Окружает сердцевину волокна и имеет показатель преломления меньший показателя преломления сердцевины волокна.

Обратное рассеяние

Backscattering

Рассеяние света в обратном направлении . См. *рэлеевское рассеяние*.

Одномодовое волокно

Singlemode fiber

Оптическое волокно, поддерживающее одну пространственную моду распространения света.

Оптическая несущая (ОС)

Optical carrier (OC)

Оптический транспортный модуль в сетях SONET. ОС-1 низшего уровня определяет скорость передачи 51,84 Мбит/с, ОС-*n* более высоких уровней (ОС-3, ОС-12, ОС-48 и ОС-192) по скорости передачи кратны ОС-1.

Оптические потери на отражение (ОПО)

Optical return loss (ORL)

Отношение мощности отраженного сигнала от неоднородности в оптическом тракте к падающей мощности.

Оптический кросс-коннект

Optical cross connect (ОХС)

Обозначает неблокирующий, оптический переключатель $N \times N$, в котором оптический сигнал, поступающий на любой входной порт, может быть направлен к произвольному выходному порту.

Оптический рефлектометр

Optical time domain reflectometer (OTDR)

Прибор для определения характеристик оптического волокна - получения его профиля. Световые импульсы рассеиваются и отражаются в обратном направлении. Измеряемая зависимость принимаемого сигнала от времени позволяет привязать неисправности и другие причины дополнительных потерь (события) в волокне к длине оптического пути, а также оценить потери на любом участке волокна.

Оптический скол

Optical cleave

Скол волокна перпендикулярно его оси для получения плоских (зеркальных) торцевых поверхностей волокна.

ГЛОССАРИЙ

Оптический телефон

Talk set

Переговорное устройство аналогичное телефону, но использующее для установления голосовой связи оптическое волокно. Обычно связь ведется по тестируемому волокну.

Оптический усилитель на волокне, легированном эрбием

Erbium-doped fiber amplifier (EDFA)

Оптический усилитель состоит из легированного эрбием оптического волокна (20-100 м) и лазера накачки для увеличения амплитуды оптического сигнала.

Оптическое волокно

Optical fiber

Волокно состоит из сердцевины и оболочки, при этом показатель преломления сердцевины больше показателя преломления оболочки для обеспечения полного внутреннего отражения света.

Оптоволоконный усилитель

Optical fiber amplifier (OFA)

Оптический усилитель (без конкретизации его технологии, включая усилитель EDFA).

Основное состояние поляризации

Principal states of polarization (PSP)

Два ортогональных состояния поляризации монохроматического пучка света, распространяющегося по волокну без искажения. Состояние поляризации этого пучка на выходе из волокна будет соответствовать одному из двух ортогональных основных состояний поляризации (PSP). В общем случае выходное состояние PSP не совпадает с входным и зависит от длины волны. Эти понятия не следует связывать с явлением двулучепреломления. Только для цельного двулучепреломляющего волокна направления PSP совпадают с направлениями быстрой и медленной осей.

Ответвитель

Coupler

Оптическое устройство, предназначенное для ответвления части оптического излучения в потоке.

Относительная интенсивность шума

Relative intensity noise (RIN)

Мера шума в полосе пропускания частот оптической несущей.

Отношение сигнал/шум

Signal-to-noise ratio (SNR)

Отношение мощности сигнала к мощности шума на приемнике.

Отражатель

Reflection generator

Устройство, отражающее часть падающей на него световой мощности обратно в волокно.

Отражение

Reflection

Изменение направления распространения света на границе между двумя разнородными материалами.

Отражение, полное внутреннее

Total internal reflection

См. Полное внутреннее отражение

Отражение, френелевское

Fresnel reflection

См. Френелевское отражение.

Передатчик

Transmitter

Оконечная аппаратура оптоволоконной сети для передачи оптических сигналов в соответствии с полученным электрическим сигналом.

Переключатель

Switch

Устройство, осуществляющее переключение световых пучков от одного или нескольких входных портов на один или несколько выходных портов.

Перекрестная фазовая модуляция

Cross-phase modulation (CPM)

Фазовая модуляция основного канала паразитным (другим) каналом.

Перекрестные помехи

Crosstalk

Перекрестные помехи в канале связи, возникающая из-за связи с паразитным (другим) каналом. Различают ближние (NEXT, или направленность) и дальние (FEXT, или изоляция) перекрестные помехи.

Перестраиваемый (по длине волны) лазер

Tunable laser

Лазер с изменяемой центральной длиной волны излучения.

Переходник (адаптер)

Connector adapter

Устройство для подсоединения волокна с соединителем на конце к измерительному прибору.

Пик поглощения ОН

ОН-peak

Диапазон длин волн в области 1390 нм соответствует пику поглощения гидроксильных ионов (ОН⁻). Кварцевые оптические волокна проявляют в этом диапазоне повышенное затухание. Эффект вызван нежелательным проникновением воды в процессе производства волокна. Некоторые производители уменьшают этот пик за счет использования новых волокон в более широком волновом диапазоне.

Плотное волновое мультиплексирование

Dense wavelength-division multiplexing (DWDM)

Технология WDM с плотным размещением каналов.

ГЛОССАРИЙ

Повторитель

Repeater

Устройство для регенерации битов цифрового сигнала. Повторитель преобразует оптический сигнал в электронный, восстанавливает синхронизацию битов, производит модуляцию несущей информационным сигналом и передает новый оптический сигнал.

Поглощение

Absorption

Потери света, связанные с различными механизмами поглощения света в среде.

Показатель преломления

Index of refraction

Определяется отношением скорости света в вакууме к скорости света в данном материале.

Показатель преломления

Refractive index

Для передачи сигнала по волокну необходимо, чтобы лучи были направляемыми, т.е. не выходили за пределы сердцевины волокна, для этого сердцевину волокна делают с большим показателем преломления, чем оболочку.

Покрытие волокна

Fiber coating

Материал, непосредственно примыкающий к *оболочке* оптического волокна, который обеспечивает его защиту и целостность.

Покрытие, защитное

Buffer coating

См. Защитное покрытие.

Полное внутреннее отражение

Total internal reflection

Физическое явление, заключающееся в полном отражении светового пучка от границы раздела двух сред и возникающее, когда световой пучок падает под косым углом из среды с большим показателем преломления на границу раздела со средой с меньшим показателем преломления и угол падения превышает некоторый критический угол, определяемый соотношением показателей преломления материала сердцевины и оболочки.

Полоса пропускания

Bandpass

Определяет диапазон частот (длин волн), пропускаемых фильтром или другим устройством.

Полоса пропускания

Bandwidth

См. Ширина полосы пропускания.

Полупроводниковый р-і-n фотодиод
р-і-n photodiode

Тип полупроводникового фотодиода, имеющего трехслойную структуру, в которой области материала с дырочной (р) и электронной (n) проводимостью разделены обедненным слоем і.

Поляризатор
Polarizer

Устройство, пропускающее световые волны с заданной ориентацией вектора электрического поля.

Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)
Polarization mode dispersion (PMD)

См. Поляризационно-модовая дисперсия.

Поляризационно-зависимая ширина полосы пропускания
Polarization dependent bandwidth (PDBW)

Зависимость спектральной ширины полосы пропускания от состояния поляризации падающего света.

Поляризационно-модовая дисперсия (ПМД)
Polarization mode dispersion (PMD)

Дисперсия света из-за двулучепреломляющих свойств материала при прохождении света через оптический компонент или при его распространении по волокну. Проявляется в задержке между двумя основными состояниями поляризации.

Поляризация
Polarization

Определяет направление вектора электрического поля распространяющейся электромагнитной волны.

Помехи, электромагнитные
Electromagnetic interference (EMI)

См. Электромагнитные помехи.

Порт
Port

Оптический интерфейс устройства (компонента).

Потери
Loss

См. Затухание.

Потери PDL
Polarization dependent loss (PDL)

См. Потери зависящие от поляризации.

Потери зависящие от поляризации
Polarization dependent loss (PDL)

Разность между максимальным и минимальным значением *потерь* (в дБ), возникающая из-за изменения состояния поляризации света, проходящего через некоторое устройство.

ГЛОССАРИЙ

Потери на изгибе

Bend loss

Возникают в результате макроизгибов (оси волокна) и микроизгибов (малые деформации волокна). Изгибы приводят к выводу части световых лучей из сердцевины в оболочку волокна и увеличению затухания.

Потери на отражение

Optical return loss (ORL)

См. Оптические потери на отражение.

Потери, вносимые

Insertion loss (IL)

См. Вносимые потери.

Преломление

Refraction

Явление изменения направления распространения света на границе между двумя материалами с различными показателями преломления.

Приемник

Receiver

Оконечная аппаратура волоконной сети связи для преобразования оптических сигналов в электрические.

Протокол

Protocol

Набор правил и процедур, необходимых для установления, поддержки и управления передачей.

Равномерность

Flatness

Спектральная однородность оптического WDM сигнала.

Разветвитель, сварной биконический

Fused biconic tapered device

См. Сварной биконический разветвитель.

Разрешение

Resolution

Разрешение измерительного прибора определяется как минимальное измеряемое значение.

Распределенный интерфейс передачи данных по волокну

Fiber distributed data interface (FDDI)

Технология и структура сети, предложенная ANSI для городских сетей (MAN). Сеть использует оптическое волокно для передачи данных со скоростью 100 Мбит/с.

Регенератор

Repeater

См. Повторитель.

Режим асинхронной передачи

Asynchronous transfer mode (ATM)

Технология высокоскоростной передачи, использующая статистическое мультиплексирование (для передачи мультимедиа - голос, видео или данные) и обеспечивающая полосу пропускания по требованию.

Рефлектометр

Optical time domain reflectometer (OTDR)

См. Оптический рефлектометр.

Решетка на основе массива волноводов

Arrayed waveguide grating (AWG)

Интегральный оптический компонент, представляющий дифракционную решетку на поверхности или в объеме оптического планарного оптического волновода и выполняющий функции оптического мультиплексора/демультиплексора. Принцип действия, используемый для разделения каналов, основан на возникновении разности фаз для различных длин волн сигнала на входе и выходе.

Рэлеевское рассеяние

Rayleigh scattering

Рассеяние света на микронеоднородностях материала (меньших длины волны) среды передачи (зависит от длины волны).

Сварной биконический разветвитель

Fused biconic tapered (FBT) device

Оптический разветвитель, состоящий из пары одномодовых скошенных оптических волокон, сваренных друг с другом по длине скоса (обычно от 2 до 5 мм). В области сварки происходит обмен энергией световых пучков от одного волокна к другому.

Светодиод

Light-emitting diode (LED)

Полупроводниковое устройство, излучающее некогерентный свет.

Светодиод с торцевым излучением

Edge-emitting LED (EELED)

Тип светодиода, излучающего через торцевую грань прямоугольной формы. Разработан для производства и тестирования WDM-компонентов.

Связь мод

Mode coupling

Обмен мощностью между модами волокна при распространении излучения в оптическом волокне.

Сердцевина

Core

Центральная часть оптического волокна, имеющая больший показатель преломления по сравнению с оболочкой и направляющая оптическое излучение.

Сеть MAN, городская сеть

Metropolitan area network (MAN)

См. Городская сеть.

ГЛОССАРИЙ

Синхронная оптическая сеть

SONET

Стандарт построения оптической сети в Северной Америке, в котором задается набор общих характеристик для оптической передачи цифровых сигналов.

Синхронная цифровая иерархия

Synchronous digital hierarchy (SDH)

Стандарт построения сети синхронной цифровой иерархии в Европе и России, в котором задается набор общих характеристик сети для оптической передачи цифровых сигналов.

Синхронный

Synchronous

Цифровая связь с постоянным временным интервалом между последовательными битами или символами. В отличие от асинхронного режима передачи не используется избыточная информация для обозначения начала и конца блока данных.

Сменный модуль

Plug-in module

Модульный принцип построения современных измерительных систем позволяет комбинируя сменные модули быстро переконфигурировать измерительную установку под определенную задачу. В случае неполадок вышедший из строя модуль легко заменяется на аналогичный запасной модуль.

Соединитель

Connector

Специальное устройство для соединения оптического волокна кабеля с передатчиком, приемником или другим оптическим кабелем.

Соединительный кабель

Pigtail

То же, что и соединительный шнур, но оконцованный соединителем только с одной стороны.

Соединительный шнур

Patchcord

Отрезок стационарного оптического кабеля с одним или несколькими волокнами, оконцованными соединителями.

Состояние поляризации

State of polarization (SOP)

Направление вектора электрического поля распространяющейся оптической волны.

Спектральная полоса

Spectral width

Мера протяженности основной рабочей характеристики оптического устройства по длине волны. Спектральная полоса для источников определяется шириной на полувысоте максимальной мощности, а для измерителей мощности оптического излучения - спектральным диапазоном чувствительности детектора.

Спектрально независимый разветвитель

Wavelength-independent coupler (WIC)

Оптический разветвитель, в котором вносимые потери не зависят от длины волны.

Сращивание

Splice

Метод постоянного, либо временного соединения двух концов оптического волокна. Существует сварное и механическое сращивание волокон.

Стабилизатор длины волны

Wavelength Locker

Устройство, вырабатывающее сигнал ошибки с амплитудой пропорциональной сдвигу длины волны лазерного источника от номинального значения.

Структура сети

Network architecture

См. Сетевая архитектура.

Сфера Пуанкаре

Poincare sphere (PS)

Трехмерное графическое представление состояния поляризации светового луча.

Темновой ток

Dark current

Ток детектора, обусловленный тепловыми явлениями в отсутствие света.

Технология DWDM

DWDM

См. Плотное волновое мультиплексирование.

Технология передачи данных FDDI

Fiber distributed data interface (FDDI)

См. Распределенный интерфейс передачи данных по оптическому волокну.

Тонкопленочный фильтр

Thin film coating-based filter

Вид спектрально избирательного фильтра. Изготавливается путем нанесения последовательности тонких слоев диэлектрика на подложку.

Топология

Topology

Физическая структура сети с конкретными связями между сетевыми элементами в сети.

Точка-точка

Point-to-point

Система связи с двумя оконечными устройствами.

Точность

Accuracy

Характеризует близость измеренного значения к истинному.

ГЛОССАРИЙ

Транзистор-транзисторная логика

Transistor-transistor logic (TTL)

Вид сигнализации, в которой номинальное напряжение +5 В отвечает логической единице (1), а номинал 0 В - логическому нулю (0). Это общепринятые соглашения для построения цифровых логических интегральных схем.

Узел

Node

Место установки сетевого элемента, предусматривающего подключение двух и более каналов связи.

Узкополосное волновое мультиплексирование

Narrowband wavelength-division multiplexing (NBWDM)

Разновидность WDM-технологии, для которой волновые каналы распределены в окрестности длины волны 1550 нм.

Универсальный разъем

Connector adapter

См. Переходник.

Уровень шума

Noise floor

Уровень оптической мощности, при котором полезный сигнал неотличим от шума. $C/Ш=1$.

Усиление

Gain

Определяется как отношение средней выходной и входной мощности без учета вклада усиленного спонтанного излучения (ASE) самого усилителя.

Усиленное спонтанное излучение

Amplified spontaneous emission (ASE)

Свет, излучаемый при спонтанном переходе на основной уровень и усиливаемый в отсутствие внешнего источника излучения. Обычно это излучение имеет широкий спектр и является неполяризованным.

Усилитель EDFA

EDFA

См. Оптический усилитель на волокне, легированном эрбием.

Усилитель, оптоволоконный

Optical fiber amplifier (OFA)

См. Оптоволоконный усилитель.

Устройство компенсации дисперсии

Dispersion compensation device (DCD)

Устройство компенсации дисперсии обеспечивает компенсацию дисперсии для передаваемого сигнала и восстанавливает первоначальную форму импульсов.

Фазовая автомодуляция

Self-phase modulation (SPM)

Влияние мощности сигнала на собственную фазу

Фильтр, модовый

Mode stripper

См. Модовый фильтр.

Фотодиод

Photodiode

Устройство, преобразующее падающий на него световой поток, в электрический ток (фототок) за счет поглощения световой энергии.

Фотон

Photon

Элементарная частица света (квант электромагнитной энергии).

Френелевское отражение

Fresnel reflection

Отражение части света, падающего на плоскую границу раздела двух однородных сред с разными *показателями преломления*. Для волокна с перпендикулярным сколом, заканчивающимся в воздухе, френелевское отражение составляет -13,9 дБ при показателе преломления волокна $n=1,46$.

Хроматическая дисперсия

Chromatic dispersion

Явление уширения оптических импульсов, обусловленное зависимостью групповой скорости распространения сигнала в оптическом волокне от длины волны. Коэффициент хроматической дисперсии на единицу длины обычно измеряется в единицах пс/(нм*км).

Центральная длина волны

Central wavelength

Длина волны, определяемая начальным моментом распределения мощности.

Центральный узел

Central office (CO)

Центральный узел сети.

Циркулятор

Circulator

Устройство, осуществляющее поворот плоскости поляризации излучения на заданный угол (например, на 90 или 180 градусов).

Частотная модуляция (ЧМ)

Frequency modulation (FM)

Способ передачи, использующий кодирование информационного сигнала с помощью частоты несущего сигнала.

Чирп, чирпирование

Chirp

Изменение частотной характеристики устройства во времени (например, модулированный лазерный диод) или в пространстве (например, чирпированная волоконная брэгговская решетка).

ГЛОССАРИЙ

Числовая апертура

Numerical aperture (NA)

Максимальный угол между осью и лучом, для которого выполняются условия полного внутреннего отражения при распространении оптического излучения по волокну, называется апертурой и измеряется в радианах.

Чувствительность

Sensitivity

Минимальная оптическая мощность необходимая для обеспечения заданного уровня работоспособности системы.

Чувствительность (фотоприемника)

Responsivity

Отношение выходного тока фотодетектора к оптической мощности на его входе. Измеряется в Ампер/Ваттах.

Ширина импульса

Pulse width

Длина оптического зондирующего импульса, напрямую связанная с его длительностью.

Ширина полосы пропускания

Bandwidth

Диапазон частот (длин волн), пропускаемых фильтром или другим устройством

Широкополосный

Broadband

Характеризует передачу широкого диапазона частот (например, голос, данные и/или видео).

Шлейф волокна

Fiber in the loop (FITL)

Волокно в виде петли между двумя линейными интерфейсами

Электромагнитные помехи (ЭП)

Electromagnetic interference (EMI)

Любые электрические или электромагнитные помехи, вызывающие ухудшение параметров, сбои в работе электронного оборудования или нежелательное поведение. Оптические волокна не вызывают электромагнитные помехи, а они, в свою очередь не влияют на сигналы, передаваемые по волокну.

Эффективный показатель преломления волокна

Group index

Определяется отношением скорости света в вакууме к скорости распространения светового сигнала в волокне. Зависит от модовой структуры волокна.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | | |
|--------------|---|---|
| ADM | Мультиплексор ввода/вывода | Add/Drop Multiplexer |
| ADSL | Асимметричная цифровая абонентская линия (Технология ADSL) | Asymmetrical Digital Subscriber Line |
| ANSI | Американский национальный институт стандартов | American Nation Standards Institute |
| APD | Лавинный фотодиод | Avalanche Photodiode |
| APS | Автоматическое защитное переключение | Automatic Protection Switching |
| ASCII | Американский стандартный код для обмена информацией (Код ASCII) | American Standard Code for Information Interchange |
| ASE | Усиленное спонтанное излучение | Amplified Spontaneous Emission |
| ATM | Режим асинхронной передачи | Asynchronous Transfer Mode |
| AWG | Решетка на основе массива волноводов | Arrayed Waveguide Grating |
| BDLA | Двухнаправленный линейный усилитель | Bidirectional Line Amplifier |
| BER | коэффициент ошибок (вероятность ошибки) | Bit Error Rate |
| BML | Уровень управления предприятием (в архитектуре TMN) | Business Management Layer (TMN architecture) |
| BW | Ширина полосы пропускания | Bandwidth |
| CATV | Кабельное телевидение | Community Antenna Television or Cable Television |
| CD | Хроматическая дисперсия | Chromatic Dispersion |
| CLEC | Альтернативный оператор связи в США | Competitive Local Exchange Carrier |
| CO | Центральный узел | Central Office |
| CORBA | Технология картриджей общих запросов к объектам (технология построения распределенных объектных приложений) | Common Object Request Broker Architecture (TMN architecture/object model) |
| CPU | Блок центрального процессора | Central Processing Unit |
| DAMA | Множественный доступ с выделением [каналов] по требованию | Demand Assignment Multiple Access |
| DBFA | Двухполосный усилитель | Dual-Band Fiber Amplifier |
| DCD | Устройство компенсации дисперсии | Dispersion Compensation Device |
| DCF | Волокно с компенсацией дисперсии | Dispersion-Compensating Fiber |
| DCOM | Распределенная компонентная объектная модель (в объектных технологиях/архитектуре TMN) | Distributed Component Object Model (TMN architecture/object model) |
| DGD | Дифференциальная групповая задержка | Differential Group Delay |
| DSF | Волокно со смещенной дисперсией | Dispersion-Shifted Fiber |
| DUT | Тестируемый компонент | Device under Test |
| DWDM | Плотное волновое мультиплексирование | Dense Wavelength Division Multiplexing |
| ECL | Лазер с внешним резонатором | External Cavity Laser |
| EDFA | Усилитель EDFA (оптический усилитель на волокне, легированном эрбием) | Erbium Doped Fiber Amplifier |
| EELED | Светодиод с торцевым излучением | Edge-Emitting LED |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | | |
|---------------|---|--|
| EIA | Ассоциация производителей электронного оборудования в США | Electronic Industries Association |
| EMI | Электромагнитная интерференция (помехи) | Electromagnetic Interference |
| EML | Уровень управления элементами (в архитектуре TMN) | Element Management Layer (TMN architecture) |
| ESA | Анализатор электрического спектра | Electrical Spectrum Analyzer |
| FBT | Сварной биконический разветвитель | Fused Biconic Tapered device |
| FDDI | Распределенный интерфейс передачи данных по оптическому волокну (стандарт FDDI) | Fiber Distributed Data Interface |
| fdf | Оптический распределительный шкаф | Fiber Distribution Frame |
| FEC | Прямое исправление ошибок (без повторной передачи) | Forward Error Correction |
| FEXT | Дальние перекрестные помехи (см. Isolation) | Far-End Crosstalk |
| FFT | Быстрое преобразование Фурье | Fast Fourier Transform |
| FITL | Шлейф волокна (петля волокна) | Fiber in the Loop |
| FM | Частотная модуляция | Frequency Modulation |
| FOA | Волоконно-оптический разъем | Fiber-Optic Adapter |
| FOM | Критерий качества | Figure of Merit |
| fs | Фемтосекунда, 1E-15 сек | Femtosecond |
| FTTC | Волокно в распределительную коробку | Fiber To The Curb |
| FWHM | Полная ширина по уровню 1/2 | Full Width Half Maximum |
| FWM | Четырехволновое смешивание | Four-Wave Mixing |
| GIS | Геоинформационная система (ГИС) | Geographical Information System |
| GPIB | Шина интерфейсов общего назначения | General Purpose Interface Bus |
| HDSL | Высокоскоростная цифровая абонентская линия (технология HDSL) | High-Rate Digital Subscriber Link |
| HeNe | Гелий-неоновый лазер | Helium-Neon laser |
| HFC | Гибридная волоконно-коаксиальная (сеть) | Hybrid Fiber Coax (network) |
| HiBi | Волокно с высоким двулучепреломлением | High Birefringence fiber |
| IEEE | Институт инженеров по электротехнике и электронике | Institute of Electrical and Electronic Engineers |
| IL | Вносимые потери | Insertion Loss |
| IM | Интерферометрический метод | Interferometric Method |
| IP | Протокол IP | Internet Protocol |
| ITU | Международный союз телекоммуникаций (структурное подразделение ООН) | International Telecommunication Union |
| IEC | Компания оператор услуг дальней связи | Inter-exchange Carrier |
| ILEC | Традиционный оператор местной связи | Incumbent Local Exchange Carrier |
| JME | Анализ на основе матриц Джонса | Jones Matrix Eigenanalysis |
| LAN | Локальная вычислительная сеть (ЛВС) | Local Area Network |
| LED | Светоизлучающий диод | Light -Emitting Diode |
| LWEDFA | Длинноволновый усилитель EDFA | Long Wavelength EDFA |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | | |
|---------------|---|--|
| MAC | Контроль доступа к среде (нижний подуровень канального уровня модели OSI) | Media Access Control |
| MAN | Региональная/городская вычислительная сеть | Metropolitan Area Network |
| MFD | Диаметр пятна моды (волокна) | Mode Field Diameter |
| MIB | Информационная база данных (системы TMN) | Management Information Base (TMN) |
| MUX | Мультиплексор | Multiplexer |
| MWM | Многоволновой измеритель | Multiwavelength Meter |
| NA | Числовая апертура | Numerical Aperture |
| NBWDM | Узкополосное волновое мультиплексирование | Narrowband Wavelength-Division Multiplexing |
| NDSF | Волокно с несмещенной дисперсией (стандартное одномодовое волокно) | Non-Dispersion-Shifted Fiber |
| NE | Сетевой элемент | Network Element |
| NEL | Уровень сетевых элементов | Network Element Layer |
| NEXT | Ближние перекрестные помехи (см. Directivity) | Near-End Crosstalk |
| NF | Шум-фактор | Noise Figure |
| NIST | Национальный институт стандартов и технологий | National Institute of Standards and Technology |
| NML | Уровень управления сетью (в архитектуре TMN) | Network Management Layer (TMN) |
| NOC | Центр сетевого управления | Network Operations Center |
| NRZ | Кодирование без возврата к нулю | Non Return to Zero |
| NZDSF | Волокно с ненулевой смещенной дисперсией | Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber |
| OADM | Оптический мультиплексор ввода/вывода | Optical Add/Drop Multiplexer |
| OC | Оптическая несущая | Optical Carrier |
| OC-3 | 155 Мбит/с (скорость передачи в сети SONET), соответствует транспортному модулю STM-1 SDH | 155 Mb/s (SONET transmission rate) |
| OC-12 | 622 Мбит/с (скорость передачи в сети SONET), соответствует модулю STM-4 SDH | 622 Mb/s (SONET transmission rate) |
| OC-48 | 2,5 Гбит/с (скорость передачи в сети SONET), соответствует модулю STM-16 SDH | 2,5 Gb/s (SONET transmission rate) |
| OC-192 | 10 Гбит/с (скорость передачи в сети SONET), соответствует модулю STM-64 SDH | 10 Gb/s (SONET transmission rate) |
| OC-768 | 40 Гбит/с (скорость передачи в сети SONET), соответствует модулю STM-256 SDH | 40 Gb/s (SONET transmission rate) |
| OCH | Оптический канал | Optical Channel |
| OCWR | Оптический рефлектометр обратного отражения | Optical Continuous Wave Reflectometer |
| OFA | Оптический волоконный усилитель | Optical Fiber Amplifier |
| OLTE | Оконечное оборудование оптической линии | Optical Line Terminating Equipment |
| OLTS | Набор устройств для измерения оптических потерь | Optical Loss Test Set |
| ONC | Контроллер оптической сети | Optical Network Controller |
| OO | Объектно-ориентированный | Object-Oriented |
| OPS | Оптическое защитное переключение (переключение на резерв) | Optical Protection Switching |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | | |
|--------------|--|--|
| ORL | Оптические потери на отражение | Optical Return Loss |
| OSA | Анализатор оптического спектра | Optical Spectrum Analyzer |
| OSC | Оптический контрольный канал | Optical Supervisory Channel |
| OSNR | Отношение сигнал/шум для оптического сигнала | Optical Signal-to-Noise Ratio |
| OSS | Система поддержки управления (системы управления) | Operation Support System (management systems) |
| OTAU | Блок доступа для оптического тестирования (центральный блок в терминологии Bellcore) | Optical Test Access Units (Bellcore/Telcordia standard name for central station) |
| OTDR | Оптический рефлектометр | Optical Time Domain Reflectometer |
| OXC | Оптический кросс-коннект | Optical Cross Connect |
| PDBW | Поляризационно-зависимая ширина полосы пропускания | Polarization Dependent Bandwidth |
| PDCW | Зависимая от поляризации центральная длина волны | Polarization Dependent Central Wavelength |
| PDFFA | Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном празеодимом | Praseodymium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier |
| PDG | Зависимость усиления от поляризации | Polarization Dependent Gain |
| PDH | Плещиохронная цифровая иерархия (технология PDH) | Plesiochronous Digital Hierarchy |
| PDL | Потери зависящие от поляризации | Polarization Dependent Loss |
| pm | Пикометр, 1E-12 м | picometr |
| PMD | Поляризационная модовая дисперсия | Polarization Mode Dispersion |
| POP | Точка присутствия | Point of Presence |
| POP3 | Почтовый протокол POP3 | Post Office Protocol Mail |
| PSA | Анализ с помощью сферы Пуанкаре | Poincaré Sphere Analysis |
| PSA | Регулятор состояния поляризации | Polarization State Adjuster |
| PSP | Основные состояния поляризации | Principal States of Polarization |
| PSTN | Телефонная сеть общего пользования | Public Switched Telephone Network |
| QoS | Качество обслуживания | Quality of Service |
| RBW | Разрешение по полосе пропускания | Resolution Bandwidth |
| RFTS | Система дистанционного тестирования волокон | Remote Fiber Test System |
| RIN | Относительная интенсивность шума | Relative Intensity Noise |
| RTU | Блок дистанционного тестирования | Remote Test Unit |
| SBS | Вынужденное (обратное) бриллюэновское рассеяние | Stimulated Brillouin (back)Scattering |
| SDH | Синхронная цифровая иерархия (Технология SDH) | Synchronous Digital Hierarchy |
| SMTP | Простой протокол электронной почты (Протокол SMTP) | Simple Mail Transfer Protocol |
| SNMP | Простой протокол управления сетью (Протокол SNMP) | Simple Network Management Protocol |
| SNR | Отношение сигнал/шум | Signal-to-Noise Ratio |
| SOA | Полупроводниковый оптический усилитель | Semiconductor Optical Amplifier |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | | |
|----------------|--|---|
| SONET | Синхронная оптическая сеть (Технология SONET) | Synchronous Optical Network |
| SOP | Состояние поляризации | State of Polarization |
| SPM | Фазовая автомодуляция | Self-Phase Modulation |
| SQL | Язык структурированных запросов (для доступа к реляционным базам данных) | Structured Query Language |
| SRS | Вынужденное рассеяние Рамана | Stimulated Raman Scattering |
| SSE | Спонтанное излучение источника | Source Spontaneous Emission |
| STM | Синхронный транспортный модуль | Synchronous Transfer Mode |
| STM-1 | Синхронный транспортный модуль STM-1 (155 Мбит/с, SDH) | Synchronous Transfer Mode STM-1 (155 Mb/s, SDH) |
| STM-4 | Синхронный транспортный модуль STM-4 (622 Мбит/с, SDH) | Synchronous Transfer Mode STM-4 (622 Mb/s, SDH) |
| STM-16 | Синхронный транспортный модуль STM-16 (2,4 Гбит/с, SDH) | Synchronous Transfer Mode STM-16 (2,5 Gb/s, SDH) |
| STM-64 | Синхронный транспортный модуль STM-64 (10 Гбит/с, SDH) | Synchronous Transfer Mode STM-64 (10 Gb/s, SDH) |
| STM-256 | Синхронный транспортный модуль STM-256 (40 Гбит/с, SDH) | Synchronous Transfer Mode STM-256 (40 Gb/s, SDH) |
| TCP/IP | Протокол управления передачей/протокол Интернет (стек протоколов TCP/IP) | Transmission Control Protocol/Internet Protocol |
| TDFFA | Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном тулием | Thulium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier |
| TDM | Временное мультиплексирование (Технология TDM) | Time-division Multiplexing |
| TLS | Перестраиваемый лазерный источник | Tunable Laser Source |
| TMN | Сеть управления телекоммуникациями | Telecommunications Management Network |
| TSC | Контроллер системы управления (название центральной станции в терминологии Bellcore) | Test System Controller (Bellcore/Telcordia standard name for central station) |
| VDSL | Широкополосная цифровая абонентская линия (Технология VDSL) | Very High Speed Digital Subscriber Line |
| VPN | Виртуальная частная сеть (передачи данных) | Virtual Private Network |
| WAN | Глобальная вычислительная сеть (передачи данных) | Wide Area Network |
| WDM | Волновое мультиплексирование (Технология WDM) | Wavelength-Division Multiplexing |
| WRM | Модуль опорного сигнала (по длине волны) | Wavelength Reference Module |
| WSFA | Метод сканирования длин волны | Wavelength-Scanning/Fixed-Analyzer |
| XPM | Перекрестная фазовая модуляция | Cross-Phase Modulation |

| | | |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| АЧХ | Характеристика спектрального усиления | Spectral-gain Characteristic |
| БПФ | Быстрое преобразование Фурье | Fast Fourier Transform |
| ВОК | Волоконно-оптический кабель | Fiber-optic Cable |
| ГИС | Геоинформационная система | Geographical Information System |
| дБ | Децибел | Decibel |
| ЛВС | Локальная вычислительная сеть | Local Area Network |
| пм | Пикометр, 1Е-12 м | Picometr |
| ПО | Программное обеспечение | Software |
| С/Ш | Отношение сигнал/шум | Signal-to-Noise Ratio |
| ТК | Тестируемый компонент | Device under Test |
| фс | Фемтосекунда, 1Е-15 сек | Femtosecond |
| ХД | Хроматическая дисперсия | Chromatic Dispersion |

| <i>Таблица спектральных диапазонов для одномодовых волокон</i> | | |
|--|----------------|--------------------------------------|
| О-диапазон | 1260 – 1360 нм | Основной (Original) |
| Е-диапазон | 1360 – 1460 нм | Расширенный (Extended) |
| S-диапазон | 1460 – 1530 нм | Коротковолновый (Short wavelength) |
| С-диапазон | 1530 – 1565 нм | Стандартный (Conventional) |
| L-диапазон | 1565 – 1625 нм | Длинноволновый (Long wavelength) |
| U-диапазон | 1625 – 1675 нм | Сверхдлинный (Ultra-long wavelength) |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Agrawal, G.P. 1992. *Fiber-Optic Communication Systems*. New York, Toronto: Wiley & Sons.
- _____. 1989. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press.
- Anderson, G.E., Telcordia Technologies Inc. (formerly Bellcore). September 26 to 30, 1999. SONET & WDM: A Shotgun Marriage? Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:121-32.
- Becker, P.C., N. A. Olsson, and J. R. Simpson. 1999. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology*, New York: Academic Press.
- Bellcore. 1996. GR-2919-CORE. Generic Criteria for SONET Point to Point Wavelength Division Multiplexed Systems in the 1550 nm Region. Piscataway, NJ.
- _____. December 1994. GR-253-CORE. Synchronous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common Generic Criteria. Piscataway, NJ.
- Born, M., and E. Wolf. 1964. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press.
- Boyd, R.W. 1992. *Nonlinear Optics*. New York: Academic Press.
- Bruyere, F., and O. Audoin. 1994. Assessment of System Penalties Induced by Polarization Mode Dispersion in a 5 Gb/s Optically Amplified Transoceanic Link. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 6:443.
- Buck, J.A. 1995. *Fundamentals of Optical Fiber*. New York: John Wiley & Sons.
- Cao, X.D., and Meyerhofer. 1994. Frequency-Domain Interferometer for Measurement of the Polarization in Mode Dispersion in Single-Mode Optical Fibers. *Opt. Lett.* 19:1837.
- CCITT Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique. Recommendation G.652. Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre Cable.
- Chabot, S., EXFO. Network Reliability: Damocles Sword? Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:433-39.
- Chon, J., H. Luo, C. Huang, R. Huang, J. Chen, and J. Bautista, Wavesplitter Technologies, Inc. September 26 to 30, 1999. Expandable 50-GHz and 100-GHz Dense Wavelength Division Multiplexers Based on Unbalanced and Cascaded-Fiber Mach Zehnder Architectures. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:89-96.
- Clark, R.C. 1947. A New Calculus for the Treatment of Optical Systems. *J. Opt. Soc. Am.* 37:110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cooperson, D.A., and M. Steinberg, Ryan Hankin Kent, Inc. The Evolution of DWDM into Optical Networking Will Develop the Metro Market in 2000. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:500-08.
- Curti, F. et al. 1990. Statistical Treatment of the Evolution of the Principal States of Polarization in Single-Mode Fibers. *J. Lightwave Tech.* 8:1162.
- Curtis, M., Ameritech. September 26 to 30, 1999. Enabling Metropolitan Area DWDM Networks. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:522-30.
- Сыр, N., G.W. Schinn, and A. Girard, EXFO. September 26 to 30, 1999. Stokes Parameter Analysis Method: The Consolidated Test Method for PMD Measurements. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:280-89.
- Damle, R., Sprint Advanced Technology Labs; R. Freund, D. Breuer, Broadband Network Design GmbH (Germany). September 26 to 30, 1999. Outside-In Evaluation of Commercial WDM Systems. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:450-54.
- Desurvire, E. 1994. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons.
- DiMichele, A., Abou-Arrage, and B. Kent, Bell Canada; J. Schallenberg, Stentor Canadian Network. September 26 to 30, 1999. Building High Capacity Broadband Metro Networks Using Optical Add-Drop Multiplex Systems. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:639-48.
- DiPasquale, R.J., A.B. Sripad, K.C. Budka, and B.W.A. Rijsman, Lucent Technologies, Inc. September 26 to 30, 1999. Breakthroughs in Robustness & Performance of Network Elements Allow Centrally-Managed Operations of Large SONET Networks. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:506-15.
- Electronic Industries Association (EIA). FOTP 50 Standard. Light Launch Conditions for Long Length Graded-Index Optical Fiber Spectral Attenuation Measurements.
- Escobar, H.E., P. Morkel, and L. Steinhorst, Fujitsu Network Communications; D. Maruhashi, K. Yamane, T. Tsuda, and K. Takatsu, Fujitsu Limited (Japan). September 26 to 30, 1999. High-Capacity DWDM System Performance—Results of 32 Channels OC-192 Over NZ-DSF. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:53-60.
- European Telecommunications Standards Institute. May 1996. Swiss Telecom PMD Specification and Information on PMD Statistics.
- EXFO Electro-Optical Engineering Inc. 1997. Introduction to WDM Testing. Québec: Imprimeries Transcontinental Inc.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Foschini, G.J., and C.D. Poole. 1991. Statistical Theory of Polarization Dispersion in Single Mode Fibers. *J. Lightwave Tech.* 9:1439.
- Galtarossa, A. et al. 1996. In-Field Comparison among Polarization Mode Dispersion Measurement Techniques. *J. Lightwave Tech.* 14:42.
- Gisin, N. 1991. Solutions of the Dynamical Equation for Polarization Dispersion. *Opt. Comm.* 86:371.
- Gisin, N., et al. 1996. How Accurately Can One Measure a Statistical Quantity Like Polarization Mode Dispersion? *Photon. Tech. Lett.* 8: 1671-1673.
- Gisin, N., and J.P. Pellaux. 1992. Polarization Mode Dispersion: Time Versus Frequency Domains. *Opt. Comm.* 89:316.
- Gisin, N. et al. 1994. Definitions and Measurements of Polarization Mode Dispersion: Interferometric Versus Fixed Analyzer Methods. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 6:730.
- Gisin, N. et al. 1995. Definition of Polarization Mode Dispersion and First Results of the COST 241 Round-Robin Measurements. *Pure App. Opt.* 4:511.
- Gisin, N. et al. 1991. Experimental Comparison between Two Different Methods for Measuring Polarization Mode Dispersion in Singlemode Fibers. *Electron. Lett.* 27:2292.
- Gisin, N. et al. 1993. Experimental Investigations of the Statistical Properties of Polarization Mode Dispersion in Single Mode Fibers. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 5:819.
- Gisin, N. et al. Oct. 17-18, 1991. Polarization Mode Dispersion Measurements in Optical Fibers, Cables, Installed Terrestrial Cables and Fiber Ribbon. *Proceedings of Optical Fiber Measurement Conference (OFMC)*. York, England. 85-88.
- Gisin, N. et al. 1991. Polarization Mode Dispersion of Short and Long Single-Mode Fibers. *J. Lightwave Tech.* 9:821.
- Gisin, N. et al. 1993. Polarization Mode Dispersion for Single-Mode Fibers with Polarization-Dependent Losses. *Opt. Comm.* 101:333.
- Heffner, B.L. 1993. Accurate, Automated Measurement of Differential Group Delay Dispersion and Principal State Variation User Jones Matrix Eigenanalysis. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 5:814.
- _____. 1992. Automated Measurement of Polarization Mode Dispersion Varies Jones Matrix Eigenanalysis. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 4:1066.
- _____. 1992. Deterministic, Analytically Complete Measurement of Polarization-Dependent Transmission through Optical Devices. *IEEE Photonics Technology Letters.* 4 (5): 451-54.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Henmi, N., S. Nakamura, and S. Hasegawa, NEC Corporation (Japan); S. Cortez, NEC America. Multiple WDM Ring-Based Transport-Network Architecture for Future Broadband-Data Services. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:213-23.
- Hewlett-Packard Company. 1998. Fiber Optic Test and Measurement. Edited by D. Dickerson. Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall PTR.
- Huard, S. 1997. Polarization of Light. New York: Wiley & Sons.
- IEC Technical Committee No. 86: Fiber Optics, Working Group 4, Subgroup 5. Calibration of Optical Spectrum Analyzers. Geneva, Switzerland.
- International Telecommunications Union (ITU): ITU Study Group 15. March 1996. Contribution 301. First Report of ITU-T International PMD Round Robin Measurements in Asia (Japan), Europe, and USA.
- _____. Nov. 15, 1995. Contribution D, 523 (4/15). PMD: Comparison of Fiber and Cable Results.
- _____. May 1996. Polarization Mode Dispersion Measurement for Single Mode Optical Fibers by Interferometric Method.
- Kashyap, R. 1999. Fiber Bragg Gratings. New York: Academic Press.
- Laude, J.P., ISA; Jobin, Y., Horiba Group (France); Lange, K., Instruments Sa, Inc., Horiba Group. September 26 to 30, 1999. Dense Wavelength Division Multiplexers and Routers Using Diffraction Gratings. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:83-88.
- Leung, J. and J. Nikolopoulos, Nortel Networks (Canada); T. Ray, MCI WorldCom. September 26 to 30, 1999. Implementation of Level 2 Routing in DWDM Networks for Enhanced OAM&P Performance. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:548-55.
- Marsh, J.A., GN Nettest. DWDM System Testing: Deployment and Maintenance Issues. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:199-205.
- McGuire, A., BT Laboratories (UK); P. Bonenfant, and J. Manchester, Lucent Technologies. September 26 to 30, 1999. IP Over WDM: The Missing Link. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:97-108.
- Mitchell, A.F., Z. Zhu, and X. Chang, MFB Communications Inc. September 26 to 30, 1999. Advances in Repeaterless Systems. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:430-41.
- Mochizuki, K. et al. 1981. Polarization Mode Fibres. Electron. Lett. 17:153.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Noutsios, P., M. O'Sullivan, D. Beckett, and S. Corbeil, Nortel Networks (Canada). Experimental and Theoretical Investigations of High PMD Impairments on an OC-192 Field System. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:290-303.
- O'Connor, D., L. Mo, and E. Catovic, Fujitsu Network Communications Inc. September 26 to 30, 1999. Packet Over SONET and DWDM—Survey and Comparison. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:109-20.
- Ocakoglu, G., N. Wauters, and P. Falcao, Hermes Europe Railtel (Belgium). September 26 to 30, 1999. Evolution of the Largest Pan-European DWDM Network: Stepping into the 21st Century. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:455-64.
- Oliva, S., Sprint Corporation; B. Crowe, Tele-Worx. September 26 to 30, 1999. Bandwidth Management Requirements & Capabilities Today. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:346-56.
- Passy, R. et al. 1992. Pressure Dependence of Polarization Mode Dispersion in HiBi Fibers. *J. Lightwave Tech.* 10:1527.
- Poole, C.D., and D.L. Favin. 1994. Polarization Mode Dispersion Measurements Based on Transmission Spectra through a Polarizer. *J. Lightwave Tech.* 12:917.
- Poole, C.D. et al. 1991. Dynamical Equation for Polarization Dispersion. *Opt. Lett.* 16:372.
- Redifer, G.B., Ericsson Inc. DWDM in the Metro Marketplace—Does It Really Cost In? Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:239-43.
- Rodio, R.J., CIENA Communications, Inc. September 26 to 30, 1999. There's More to Optical Networking than Buying "ITU-Compliant" Lasers. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:442-49.
- Ross, J. and R. Bryttegard, Fujitsu Network Communications, Inc.; J. Schmit, and L. Chow, Tellabs Operations, Inc.; S. Kalambar, Lucent Technologies, Inc.; G. Buehler, Siemens AG; N. Davis, Nortel Networks. September 26 to 30, 1999. Achieving Integrated Management for Multi-Vendor, Multi-Technology Transport Networks. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:183-88.
- Saito, T., T. Ota, H. Ogoshi, and T. Tsuda, The Furukawa Electric Co., Ltd. (Japan). September 26 to 30, 1999. 50-GHz Channel Spacing Multiplexer/Demultiplexer Combined by Two 100-GHz Channel Spacing AWGs and FBGs. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:73-82.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sexton, M., and A. Reid. 1992. *Transmission Networking: SONET and the Synchronous Digital Hierarchy*. MA, USA and London, England: Artech House.
- Smith, K., and L. McInerney, TTC. September 26 to 30, 1999. *A Comprehensive Strategy for Testing DWDM Systems*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:187-98.
- Sudo, S. 1997. *Optical Fiber Amplifiers*. MA, USA and London, England: Artech House.
- Telecommunications Industry Association (TIA). FOTP – 113. *Polarization Mode Dispersion Measurement for Single-Mode Optical Fibers by Fixed Analyzer*.
- _____. FOTP – 124. *Polarization Mode Dispersion Measurement for Single-Mode Optical Fibers by Interferometric Method*.
- _____. FOTP – 122. *Polarization Mode Dispersion Measurement for Single-Mode Optical Fibers by Jones Matrix Eigenanalysis*.
- Tetu, M. 1997. *Absolute Wavelength Stability Ions*. Optical Fiber Communications Conference. Dallas, TX: Optical Society of America. Tutorial FE1: 167-220.
- Tyrone, Jr., B.H., Southwestern Bell Technology Resources; X. Lee, Nortel Networks; S. Vigot, EXFO. September 26 to 30, 1999. *Testing Requirements for Dense WDM Optically Amplified Links*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:181-86.
- Walsh, A., Telcordia Technologies, Inc. (formerly Bellcore); S. Gloeckle, Ameritech. September 26 to 30, 1999. *Management of Bandwidth on SONET Ring Architectures in the Network View*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:357-67.
- Wilder, M.R., Anritsu Company. *Testing Fibers Carrying DWDM Traffic*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 2:422-26.
- Wright, A., R. Yarlagadda, Williams Communications. September 26 to 30, 1999. *Field Trail of OC-48 ATM Directly Over DWDM*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:133-37.
- Wu, L.-R., Hitachi Telecom (USA), Inc. September 26 to 30, 1999. *Increasing WDM Throughput Efficiency with Generic TDM*. Technical Proceedings. Chicago: National Fiber Optic Engineers Conference. 1:306-15.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптическая техника; история, достижения, перспективы // Сб. статей под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. – М.: Connect, 2000.
2. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 1999.
3. Назаров А. Н., Симонов М. В. АТМ: Технология высокоскоростных сетей. - М.: Эко-Трендз, 1998.
4. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000.
5. Кемельбеков Б. Ж., Мышкин В. Ф., Хан В. А. Современные проблемы волоконно-оптических линий связи, т.1. Волоконно-оптические кабели. – М.: НТЛ, 1999.
6. Конструкции, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. – Женева: МСЭ – Т. Сектор стандартизации МСЭ, 1994.
7. Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999.
8. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987.
9. Сабинин Н. К., Шмалько А. В. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. – ВКСС, Connect! 2000, №3 (72-84).
10. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2000.
11. Хволес Е. А., Ходатай В. Г., Шмалько А. В. Волоконно-оптические линии связи и проблемы их надежности. – ВКСС, Connect! 2000, №4.
12. Гаскевич Е. Б., Убайдуллаев Р. Р., Шмалько А. В. Системы мониторинга оптических кабелей ВОЛС. – ВКСС, Connect! 2001, №1.
13. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990.
14. Шмалько А. В. Цифровые сети связи: Основы планирования и построения. – М.: Эко-Трендз, 2001.
15. Бродниковский А. М., Убайдуллаев Р. Р. Поляризационная модовая дисперсия РМД волоконно-оптических систем передачи. – Метрология и измерительная техника связи 2001, №3.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ