**Содержание**

Введение

1. Основы технологии DWDM

1.1 Устройства волнового уплотнения DWDM

1.2 Модель взаимодействия DWDM с транспортными технологиями

1.3 Классификация WDM на основе канального плана

2. Сравнение систем мультиплексирования и выбор компонентов линии связи

2.1 Параметры многоволновых мультиплексных линий связи

2.2 Технологии мультиплексирования

2.3 Источники излучения. Лазерные диоды

2.4 Реализация усилителей EDFA

2.5 Выбор одномодового оптического волокна для проектируемой ВОЛС

3. Влияние дисперсии на параметры проектируемой ВОЛС

3.1 Методы компенсации дисперсии

3.2 Выбор волокна для компенсации дисперсии

4. Расчет длины регенерационного участка

4.1 Расчет длины регенерационного участка с учетом хроматической дисперсии

4.2 Расчет длины регенерационного участка с учетом поляризационно-модовой дисперсии (PMD)

4.3 Расчет эксплуатационного запаса по затуханию

4.4 Расчет длины волокна компенсации дисперсии

5. Моделирование 8-ми канальной DWDM линии с применением системы автоматизированнного проектирования LinkSim

5.1 Описание компонентов моделируемой ВОЛС и их параметров

5.2 Результаты моделирования 8-ми канальной DWDM

6. Подбор промышленного оборудования для проектируемой ВОЛС

6.1 Характеристики промышленных мультиплексоров DWDM

6.2 Подбор транспортной системы проектируемой линии связи

6.3 Подбор оптического кабеля для проектируемой линии связи

7. Прокладка оптического кабеля

Экономическая часть

Техника безопасности

Заключение

Список литературы

Приложение

**Введение**

В развитых странах волоконно-оптическая связь заняла лидирующее положение среди других средств связи. Ее отличительной чертой является значительно более высокая скорость передачи информации и более высокая надежность по сравнению с проводной электросвязью и радиосвязью. Именно эти качества обусловили быстрое развитие волоконно-оптических систем связи за последние 10-15 лет. В настоящее время в мире проложено уже более 100 млн. км таких линий связи. Более того, все континенты связаны подводными волоконно-оптическими линиями связи, общая длина которых превышает 300 тыс. км. Разрабатываются и испытываются волоконно-оптические системы связи нового поколения с пропускной способностью в десятки и сотни Гбит/с, а в перспективе - до нескольких Тбит/с. Эти системы используют новые принципы передачи информации - оптические солитоны и спектральное разделение каналов, а также принципиально новую элементную базу, основанную на новых материалах и современных технологиях.

Разработка систем передачи информации нового поколения, прежде всего, вызвана потребностями экономики. Известно, что для увеличения вдвое национального валового продукта необходимо обеспечить 4-кратное увеличение объема передаваемой информации.

Сегодняшний этап развития волоконно-оптических систем связи в мире характеризуется серьезным технологическим прорывом в области элементной базы, позволившим совершить значительный скачок в повышении пропускной способности ВОЛС. На повестке дня стоит вопрос о практическом внедрении ВОЛС с пропускной способностью 1 Тбит/с и более.

Важнейшими элементами высокоскоростных волоконно-оптических сетей являются передающие и приемные модули, модуляторы, широкополосные оптические усилители, компенсаторы дисперсии, демультиплексоры и коммутаторы.

Успехи в технологии создания высококачественных источников излучения и фотодетекторов для высокоскоростных ВОЛС позволили удовлетворить практически все современные потребности пользователей и операторов сетей связи в широком диапазоне скоростей.

Наиболее широкое применение в перспективных ВОЛС со спектральным разделением каналов могут найти перестраиваемые по длинам волн полупроводниковые лазеры. К этим устройствам предъявляются довольно жесткие требования по стабильности спектральных характеристик. Основные же усилия разработчиков в настоящее время направлены на снижение стоимости этих устройств с целью обеспечения более высокой конкурентоспособности ВОЛС со спектральным разделением каналов по сравнению с другими типами ВОЛС, наращивание пропускной способности которых требует использования дополнительных оптических волокон или увеличения скорости передачи при временном уплотнении каналов.

Дальнейшее развитие ОСП базируется на двух основных концепциях, которые неразрывно связаны между собой. Это многоволновые системы передачи (DenseWDM). Где имеется несколько передатчиков, сигналы которых поступают на оптический мультиплексор, на приемной стороне происходит обратное преобразование.

Второй составляющей являются, так называемые полностью оптические сети (AON). В них используются оптические усилители, наиболее перспективными. из которых являются EDFA (Erbium Doped fiber Amplifer).В линии отсутствуют регенераторы, вместо них устанавливаются аналоговые усилители , которые без преобразования принятого оптического сигнала в электрический, просто увеличивают его амплитуду и передают дальше. С увеличением протяженности линии падает отношение сигнал/шум, т.к. шумы в линии суммируются и на усилителе их амплитуда возрастает вместе с сигналом. Эта технология обладает очень важным приемуществом – это отсутствие привязки к скорости и протоколу передачи.

В дипломной работе мне была поставлены следующие задачи:

1. Изучить основные компоненты ВОЛС содержащей DWDM.
2. Изучить основные методы мультиплексирования оптических сигналов.
3. Моделировать ВОЛС на Сапре LinkSim, для ее практического применения

* Вероятноть ошибок BER≤10-13.
* Общая длина магистрали ВОЛС 550.
* Скорость передачи 2.5Гб/с.

1. Подобрать для проектируемой ВОЛС промышленное оборудование, волокно, тип прокладки ОК.
2. Произвести расчет экономической эффективности при использовании проектируемой ВОЛС.

дисперсия линия связь

**1. Основы технологии WDM**

# **1.1 Устройства волнового уплотнения WDM**

# Устройство волнового (спектрального) уплотнения WDM - WDM фильтр - выполняет функции мультиплексирования MUX (объединения) или демультиплексирования DEMUX (выделения или фильтрации) оптических сигналов разных длин волн - каналов - в одно волокно из множества волокон или из одного волокна в несколько волокон. На передающей и приемной сторонах могут устанавливаться однотипные устройства, но работающие в режимах MUX и DEMUX соответственно. Сам факт существования устройств WDM основан на свойстве волокна пропускать множество каналов, которые распространяются по волокну, не взаимодействуя между собой, рисунок 1.1.

Первые устройства WDM появились в начале 90-х годов. В основном это были широко-зонные двухканальные системы с длинами волн 1310 нм и 1550 нм. В дальнейшем по мере все большего освоения окна 1550 нм появляются прецизионные узкозонные WDM устройства с мультиплексируемыми длинами волн, полностью лежащими в окне 1550 нм. Это позволяет строить протяженные магистрали с множеством каналов на волокно. Катализатором прогресса становятся оптические усилители EDFA. Практически вся рабочая область длин волн (pass-band), в которой усилитель EDFA имеет достаточно высокий коэффициент усиления и приемлемое отношение сигнал/шум (1530-1560 нм), отводится в распоряжение систем волнового уплотнения. Термин DWDM (dense wavelength division multiplexer) - плотное волновое мультиплексирование - используется по отношению к WDM устройствам с расстоянием между соседними каналами 1,6 нм и менее. Для построения многоканальных WDM систем наряду с пассивными WDM фильтрами также требуются узкополосные лазеры, стабильно выдерживающие нужную длину волны. Пока именно лазеры остаются наиболее дорогим элементом в таких системах, несколько сдерживая их развитие. В настоящее время поставляются системы с числом каналов 4, 8 ,16 и 32. Предполагается рост числа мультиплексных каналов до 64.



Рисунок 1.1 Схема оптического сегмента, использующего передачу мультиплексного сигнала по волокну.

**1.2 Модель взаимодействия WDM с транспортными технологиями**

В настоящее время WDM играет для оптических синхронных систем ту же роль, что и мультиплексирование с частотным разделением МЧР (FDM) для аналоговых систем передачи данных. По этой причине системы с WDM часто называют системами оптического мультиплексирования с частотным разделением ОМЧР (OFDM). Однако по сути своей эти технологии (FDM и OFDM) существенно отличаются друг от друга. Их отличие состоит не только в использовании оптического (OFDM) или электрического (FDM) сигнала. При FDM используется механизм АМ модуляции с одной боковой полосой (ОБП) и выбранной системой поднесущих, модулирующий сигнал которых одинаков по структуре, так как представлен набором стандартных каналов ТЧ. При OFDM механизм модуляции, необходимый в FDM для сдвига несущих, вообще не используется, несущие генерируются отдельными источниками (лазерами), сигналы которых просто объединяются мультиплексором в единый многочастотный сигнал. Каждая его составляющая (несущая) принципиально может передавать поток цифровых сигналов, сформированный по законам различных синхронных технологий. Например, одна несущая формально может передавать АТМ трафик, другая SDH, третья PDH и т.д. Для этого несущие модулируются цифровым сигналом в соответствии с передаваемым трафиком.

Формально для систем WDM не важно, какие методы кодирования и формирования конкретного цифрового сигнала использовались. Хотя, как правило, в этих системах и передается однотипный трафик, это диктуется используемыми методами синхронизации и единообразием процесса обработки. В отличие от систем SDH транспортируемый сигнал не упаковывается в контейнеры и не подвергается обработке в соответствии со структурой мультиплексирования SDH для формирования транспортного модуля STM-N, который только и может быть передан через физический уровень в канал связи (среду передачи).

Если упрощенно представить многоуровневую модель взаимодействия основных технологий SDH/SONET, ATM, IP (без учета возможности переноса IP через ATM), осуществляющих транспортировку сигнала в глобальных цифровых сетях, и WDM, то до появления последней она имела вид, представленный на рисунок 1.2.а. Модель состояла из трех уровней и оптической среды передачи и показывала, что для транспортировки трафика верхнего уровня (ATM и IP) по оптической среде передачи он должен быть размещен (инкапсулирован) в транспортные модули STM-N/OC-n технологий SDH/SONET, способные, используя физический интерфейс этих технологий, пройти через физический уровень в оптическую среду передачи. Отсюда была ясна необходимость создания технологий инкапсуляции ячеек АТМ, например, в виртуальные контейнеры SDH (ATM over SDH), или пакетов IP в виртуальные трибы SONET (IP over SONET). Этим и занимались соответствующие подкомитеты по стандартизации в таких институтах, как ANSI, ISO, ITU-T и ETSI, разрабатывая стандарты на указанные технологии.

После появления систем WDM модель принимает вид, представленный на рисунок 1.2.б. Теперь модель имеет четыре уровня, не считая оптической среды передачи. Появился промежуточный уровень WDM, который, как и SDH/SONET, обеспечивает физический интерфейс, позволяющий через физический уровень выйти в оптическую среду передачи не только технологии SDH/SONET, но и технологиям ATM и IP. В последнем случае не требуется инкапсуляции ячеек ATM или пакетов IP в промежуточный транспортный модуль технологий SDH/SONET, что не только упрощает процедуру обработки и транспортировки трафика, генерируемого системами ATM и IP, но и существенно уменьшает общую длину заголовков (которые пристыковываются по мере прохождения с верхнего уровня на нижний), повышая процент, занимаемый информационной составляющей трафика, в общей длине передаваемого сообщения, а значит, и эффективность передачи в целом. Естественно, что ATM и IP трафик может быть передан и по традиционной схеме с использованием SDH/SONET, трафик которых может быть также передан с помощью систем WDM, что сохраняет преемственность старых схем транспортировки и увеличивает гибкость композитных систем WDM-SDH/SONET в целом.

## **1.3 Классификация WDM на основе канального плана**

## Схема расширенного канального плана позволяет предложить следующую схему классификации, учитывающую современные взгляды и тенденции выделять три типа мультиплексоров WDM:

•обычные WDM – МРДВ, •плотные WDM (DWDM) – ПМРДВ, •высокоплотные WDM (HDWDM) – ВПМРДВ.

Хотя до сих пор и нет точных границ деления между этими типами, можно предложить, вслед за специалистами компании Alcatel, некоторые границы, основанные на исторической практике разработки систем WDM и указанном выше стандарте G.692 с его канальным планом, называемым также “волновым планом” или “частотным планом” в зависимости от того, используется ли волновая или частотная шкала канального плана. Итак, можно называть:•системами WDM – системы с частотным разносом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов, •системами DWDM – системы с разносом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 64 каналов, •системами HDWDM – системы с разносом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

2. Сравнение систем мультиплексирования и выбор компонентов линии связи

Большинство оптических коммуникационных устройств и элементов, применяемых в AON (полностью оптические сети), используют цифровую передачу сигнала с модуляцией интенсивности, при которой бинарной 1 соответствует передача света большой интенсивности, а бинарному 0 - передача света низкой интенсивности. Последнее связано с тем, что оптические усилители EDFA вносят дополнительный шум в усиление оптического сигнала.

Ниже приведены основные устройства и элементы, применяемые в AON.

Лазеры и светодиоды. В качестве источников излучения могут использоваться светодиоды и лазеры. Светодиоды рассчитаны на больший диаметр сердцевины волокна (многомодовые волокна), а лазеры лучше подходят для передачи сигнала по одномодовому волокну. Типичные значения спектральной полосы излучения составляют для светодиодов от 20 до 100 нм, для многомодовых лазерных диодов от 1 до 5 нм и для одномодовых лазерных диодов менее 0,1 нм. Потребляемая мощность для светодиодов - около 10 мВт, и порядка 1 мВт для лазерных диодов. Выпускаются как недорогие коммерческие pin-фотодиоды на основе InGaAsP, работающие на длине волны 1300 нм и обеспечивающие скорость передачи до 100 Мбит/с, так и специализированные лазеры с распределенной обратной связью (DFB), предназначенные для работы в окне 1550 нм и обеспечивающие скорость передачи до 10 Гбит/с.

Волокно. Наибольшее распространение получили три типа одномодового волокна: одномодовое волокно со ступенчатым профилем (стандартное волокно, standard fiber, SF), волокно со смещенной дисперсией (dispersion shifted fiber, DSF), волокно с ненулевой смещенной дисперсией (non-zero dispersion shifted fiber, NZDSF), а также два типа градиентного многомодового волокна стандартов 50/125 и 62,5/125. В протяженных магистралях применяются исключительно одномодовые волокна из-за лучших дисперсионных характеристик. Для многоканальной мультиплексной передачи лучше всего подходит волокно типа NZDSF, а наименее удачным оказалось одномодовое волокно DSF.

Использование многомодового волокна ограничено локальными сетями с характерными длинами сегментов до 2 км. В то же время в локальных сетях все чаще начинает использоваться, наряду с многомодовым, и одномодовое волокно, обеспечивающее более высокую полосу пропускания. Это связано с падением стоимости лазерных оптических передатчиков и возрастающим числом сетевых приложений, требующих большой полосы пропускания, которую может обеспечить только одномодовое волокно.

Приемопередатчики. Выпускаются разнообразные приемо-передающие оптоэлектронные модули, предназначенные для сетей FDDI, Fast Ethernet (скорость передачи 100 Мбит/с, частота модуляции 125 МГц), АТМ (STM-1 155Мбит/с, частота модуляции 194 МГц), более быстрые для сетей STM-4 622 Мбит/с (частота модуляции 778 МГц) и Gigabit Ethernet (1000 Мбит/с, частота модуляции 1250 МГц), и еще более быстрые, предназначенные для передачи каналов STM-16 (2,5 Гбит/с), и, наконец, STM-64 (10 Гбит/с).

Пассивные оптические мультиплексоры/демультиплексоры. В настоящее время выпускается огромное число устройств, от простых мультиплексоров и направленных ответвителей WDM, до сложных устройств, обеспечивающих плотное волновое мультиплексирование/демультиплексирование (DWDM) с числом каналов до 40 и более.

Оптический мультиплексор собирает несколько простых сигналов разных длин волн из нескольких волокон в мультиплексный сигнал, распространяющийся по одному волокну. Демультиплексор выполняет обратную функцию и обеспечивает выделение каналов в отдельные волокна из сложного мультиплексного сигнала, представленного множеством каналов и идущего по одному волокну.

Оптические усилители требуются в сетях при больших расстояниях между регенераторами. В полностью оптических сетях широкое распространение получили эрбиевые усилители EDFA, использующие лазер накачки с длиной волны 980 нм или 1480 нм. Работая в диапазоне от 1535 до 1560 нм, они могут обеспечивать усиление входного сигнала на 30-38 дБ в зависимости от его длины волны. Усилители EDFA не только заменили дорогостоящие оптоэлектронные системы регенерации оптического сигнала, но обеспечили возможность усиления многоканального WDM сигнала, сокращая число электронных регенераторов на протяженной оптической мультиплексной линии.

Оптические коммутаторы выполняют в полностью оптических сетях ту же функцию, что и обычные электронные коммутаторы в традиционных сетях, а именно обеспечивают коммутацию каналов или коммутацию пакетов. Наряду с простейшим коммутатором 2х2 в настоящее время начали поставляться коммутаторы с числом портов 4х4, 8х8 и 16х16.

Фильтры предназначены для выделения одного нужного канала из множества мультиплексных каналов, распространяемых в волокне. Поскольку фотоприемники имеют обычно широкую спектральную область чувствительности, то фильтр необходим для того, чтобы подавить (ослабить) соседние каналы. Наряду с фильтрами, предназначенными для работы на определенной длине волны, выпускаются также фильтры с перестраиваемой длиной волны. Функции фильтра может выполнять оптический демультиплексор.

Волновые конвертеры предназначены для преобразования одной длины волны в другую. Если информационный сигнал в подсети 1 был представлен каналом на длине волны, которая уже задействована в другой подсети - подсети 2, то волновой конвертер может преобразовать этот сигнал при переходе из подсети 1 в подсеть 2 на другую свободную в подсети 2 длину волны, обеспечив прозрачную связь между устройствами в разных подсетях.

* 1. **Параметры многоволновых мультиплексных линий связи**

Три основных черты магистральной многоволновых линий связи – высокая частота модуляции сигналов в каналах (высокая битовая скорость), высокая плотность мультиплексных каналов и большие расстояния сегментов – заставляют более строго подходить к требованиям по передаче информации. Наиболее важные факторы, ограничивающие технические возможности оптической линии приведены ниже.

Соотношение сигнал-шум. Для того, чтобы поддержать необходимое отношение сигнал-шум, число последовательных узлов EDFA, должно бить ограничено. Оптические усилители EDFA вносят шум, и при большом числе последовательных соединений могут приводить к значительной деградации сигнала. Моделирование без учета влияния дисперсии сигнала в волокне показывает, что максимум 18 каскадов EDFA может быть установлено между регенераторами при скорости передачи 622Мбит/с с приемлемым для стандарта STM-4 соотношение сигнал/шум всего 11 узлов при скорости передачи 2,5Гбит/с с удовлетворительным соотношением сигнал/шум. Реальное число каскадов EDFA из-за дисперсионной деградации сигнала уменьшается примерно в два раза.

Полоса пропускания усилителей EDFA. Поскольку передаточная характеристика EDFA в рабочей области не плоская даже для фтор-цирконатных EDFA, то разброс в 2 дБ остается при коэффициенте усиления 30 дБ. После 50 каскадов усилений начальная зона в 30 нм сокращается до 10 нм. С этой точки зрения желательно для передачи использовать плотно расположенные волновые каналы (DWDM) и в области наибольшего плато. При передаче мультиплексного сигнала, размещенного в широкой зоне EDFA, в случае большого числа каскадов, могут требоваться специальные эквалайзеры, вносящие затухание на тех длинах волн, соответствующие каналы которых испытывают наибольшее усиление.

Поперечные помехи. Поперечные помехи могут быть как межзонными, так и внутризонными. Межзонные помехи возникают между двумя различными длинами волн и обычно не носят кумулятивный характер, поскольку существует множество фильтров в сети. Для их подавления достаточно поставить соответствующий узкозонный фильтр перед оптическим приемником. Внутризонные помехи значительно сложнее контролировать. Они могут накапливаться, и простым способом их подавить невозможно. Анализ показывает, что чувствительность фильтра должна быть более, чем на 20 дБ ниже для соседней длины волны, чтобы минимизировать эффект внутризонных помех. Внутризонные помехи могут включать когерентные биения. При расчете и создании архитектур полностью оптических сетей следует оценивать вклад от внутризонных помех. Простые фильтры типа Фабри-Перо не имеют достаточно резкой передаточной характеристики, чтобы уменьшить внутризонные поперечные помехи.

Линейная дисперсия волокна. Основным фактором является систематическое накопление хроматической дисперсии в одномодовом волокне, которая для волокна типа NZDSF может достигать 5-6 пс/нм в расчете на 1 км. Полная допустимая величина дисперсии в оптическом сегменте между регенераторами зависит от стандарта.

Нелинейная дисперсия EDFA. Использование оптических усилителей позволяет компенсировать потери мощности в волокне, но это создает дополнительные нелинейности - хвосты в спектральном представлении сигнала (волнового пакета), несущие меньшую мощность испытывают большее усиление по сравнению с центральной частью пакета, приводя к появлению нелинейной дисперсии. Увеличение пролетов между каскадами EDFA, и, соответственно, уменьшение числа самих каскадов, снижает нелинейную дисперсию, но усиление более слабого сигнала приводит к уменьшению соотношения сигнал/шум.

Поляризационная модовая дисперсия (PMD). Эта дисперсия возникает в волокне из-за неидеальной циркулярности реального волокна. Практически PMD начинает вносить ограничение на длину безрегенерационного участка только при очень большой скорости передачи на канал (10 Гбит/с). При этом максимальное значение PMD в линии не должно быть больше 1/10 от битового интервала. PMD нелинейно зависит от расстояния L (как L-1/2), поэтому растет медленнее с ростом расстояния.

Стимулированное Рамановское рассеяние. Этот нелинейный эффект, также известный как спонтанное комбинационное рассеяние, связан с рассеянием света на колебаниях поляризованных молекул волокна. Под действием света большой интенсивности происходит поляризация совершающих тепловые колебания молекул, при этом сам падающий свет испытывает рассеяние, трансформируя часть своей энергии как в традиционный рэлеевский компонент (на частоте падающего света н), так и в два боковых нелинейных компонента: стоксовый (на частоте н -д) и антистоксовый (на частоте н +д), где д- частота колебаний молекул в волокне.

Именно два нелинейных компонента приводят к поперечным помехам между каналами в мультиплексном сигнале и, в конечном итоге, к его деградации. Из-за этого, в частности при мощности передатчика 0 дБм и межканальном интервале 4 нм, только 8 каналов можно мультиплексировать при протяженности линии 1000 км, и только 4 канала при протяженности 8000 км .

Четырехволновое смешивание - FWM. Природа нелинейного эффекта FWM связана с наличием слабой зависимости показателя преломления волокна от интенсивности распространяемого по нему света, в результате чего из двух волн с частотами нi и нj появляется две новые волны с частотами нk и нl причем нi + нj = нk + нl как того требует закон сохранения энергии. При попадании новых волн в спектральные области существующих каналов будут иметь место поперечные помехи между каналами. Влияние поперечных помех из-за FWM увеличивается с приближением хроматической дисперсии к нулю и максимально в окрестности точки нулевой дисперсии. Наиболее сильно подвержены влиянию FWM волокно с нулевой смещенной дисперсией DSF – длина волны нулевой дисперсии у этого волокна попадает в рабочую область усиления EDFA.

Итак технические параметры оптических систем – протяженность сегментов, число мультиплексных каналов в одном волокне, интервалы между каналами, битовая скорость и др. Для увеличения транспортных свойств следует руководствоваться следующими критериями:

- уменьшать интервалы между каналами (при необходимо принимать во внимание, что в волокно DSF сильные поперечные помехи в каналах могут возникать из-за FWM по мере приближения к точке нулевой дисперсии);

- минимизировать число длин волн при протяженных пролетах и большом числе каскадов EDFA;

- стремиться не делать очень большой мощность вводимого излучения – в противном случае, все нелинейные эффекты начинают проявляться особенно сильно (новое волокно фирмы Coning LEAF с большим диаметром модового поля позволяет уменьшить влияние нелинейных эффектов при сохранении прежней мощности, вводимой в волокно, поскольку интенсивность излучения на единицу площади сечения сердцевины уменьшается);

- использовать оптические усилители с большой мощностью насыщения;

- по возможности, уменьшать число оптических компонентов, вносящих потери.

**2.2 Технологии мультиплексирования**

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

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.

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. 2.2).

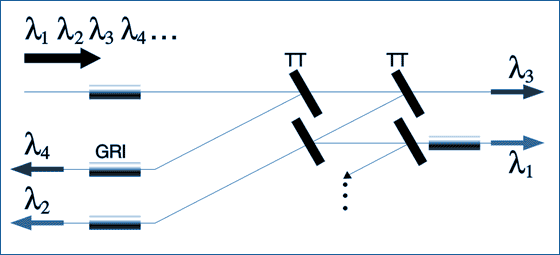


Рисунок 2.2 Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала.

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.

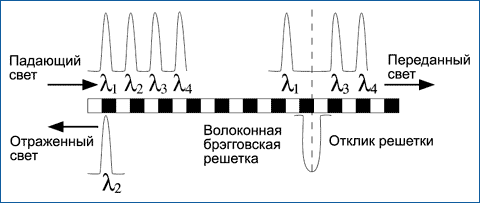


Рисунок 2.3 Волоконная брэгговская решетка выделяет из составного сигнала канал определенной длины волны.

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.

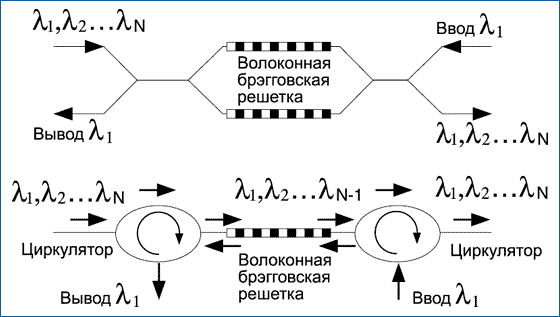


Рисунок 2.4 Использование волоконных брэгговских решеток в мультиплексорах ввода/вывода каналов.

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. 2.4, слева). Со стороны порта ввода циркулятор добавляет в передаваемый составной сигнал один канал на той же длине волны, что была выделена (рис. 2.4, 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. 2.5).

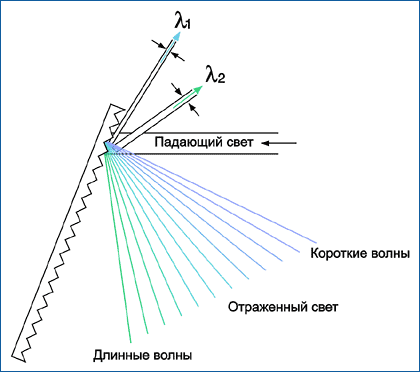


Рисунок 2.5 Отражение составного сигнала дифракционной решеткой.

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 демультиплексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлен 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.

Технология, использующая дифракционную решетку на массиве волноводов.

В основе первой из них (см. рис. 2.6) положен обобщенный принцип инетерферометра Маха-Цендера. Мультиплексор AWG состоит из двух многопортовых разветвителей (входного и выходного), соединенных массивом планарных оптических волноводов (МПОВ). Длина каждого волновода Li отличается от соседних на фиксированную величину ΔL,

Li = Li-1 + ΔL, Li+1 =Li + ΔL.

Следовательно, каждую пару волноводов вместе с входным и выходным разветвителями можно рассматривать как интерферометр Маха-Цендера. AWG в целом - как обобщенный интерферометр Маха-Цендера, т.е. устройство, генерирующее n копий входного сигнала (с помощью входного разветвителя), распространяющихся в одинаковых средах различной длины, и складывающее эти сигналы, пришедшие с разным фазовым запаздыванием, на выходе (с помощью выходного разветвителя).

AWG может использоваться как мультиплексор (n:1) осуществляющий объединение n входных сигналов с группы входных портов λi1 , λi2 ,…, λin в один выходной - λi0 , или демультиплексор (1:n ), осуществляющий разбиение входного потока λ0 = Σλi (i =1,2, ... n) на отдельные несущие λ01 , λ02 ,…, λ0n и подачу их на группу выходных портов n.

Эту схему конечно можно было реализовать с помощью соединения n/2 MZI, однако схему AWG проще реализовать в виде планарной схемы с помощью интегральных оптических технологий, так как входной и выходной разветвители и массив волноводов реализуются на одной кремниевой подложке. Волноводы реализуются в виде планарных оптоволоконные световодов (диоксид кремния, легированный Ge или Та), сформированных на этой же подложке. 32-канальные AWG производятся промышленностью в виде готовых модулей, отличающихся малыми габаритами и средним уровнем вносимых потерь (см табл 2.1). Их температурный коэффициент достаточно высок (0,01 нм/С),что требует использования стабилизаторов температуры.

Схема мультиплексирования WDM на основе дифракционной решетки на массиве волноводов: а) схема мультиплексора с одним разветвителем и отражательным зеркалом; б) схема мультиплексора с входным и выходным разветвителями; в) конструкция входного разветвителя по схеме с кругом Роуленда.

Принцип работы мультиплексора A WG. Допустим, что он имеет входной nхm и выходной mхn разветвители, соединенные массивом из m световодов, длина которых отличается на ΔL, т.е. Li+1 = Li + ΔL. Входной разветвитель расщепляет сигнал с любого входного порта i на m входов массива световодов, пусть это будет световод k. Пусть далее выходной разветвитель соединяет любой из m выходов массива световодов с выходным портом j. Тогда общий путь, проходимый светом от порта i до порта j через световод k равен Dikj = (dik + Lk + dkj). Длина Lk = L1 + ( k-l )ΔL, где L1 длина минимального (первого) световода. Пусть аналогично длина dik = dt + (k - l)δdi, a

dkj = dj + (k-l )δdj,

где di и dj минимальные пути пути между входными/выходными портами разветвителей и входами/выходами световодов. Тогда относительные фазы сигналов, проходящих от порта i до порта j через любой световод k, т.е. k-1,2, ... ,m, равны:

ϕikj = 2πn1(di+ dj)/λ + 2π (k-l) \*{n1(δdii+ δdj) + n2 ΔL}/λ (1)

Здесь n2 и n1 - коэффициенты преломления материала световодов (n2) и входного и выходного разветвителей (n1).

Первое слагаемое в (1) постоянно, второе - дает изменение относительной фазы δϕikj. Те из волн, проходящих по пути Dikj, для которых {n1(δdi+ δdj) + n2 ΔL } = рλ будут складываться в фазе на выходе j, a, следовательно, несущая λ будет демодулироваться. Указанное условие будет выполняться (но для другого λ ), если заменить р на р +1, т.е. будет демодулироваться λ' и т. д . Это говорит о том, что:

-АВХ мультиплексора AWG имеет периодическую, гребенчатую форму;

-все длины волн системы WDM должны лежать в соответствующем свободном спектральном диапазоне FSR.

Указанные свойства напоминают нам интерферометрический фильтр на резонаторе Фабри-Перо, а физика работы говорит о том, что массив световодов с длиной каждого, отличающейся от соседних на ΔL, играет роль дифракционной решетки, что делает понятным его название мультиплексор на основе дифракционной решетки на массиве волноводов.

Для понимания работы этого широко используемого типа мультиплексоров WDM интересно сделать некоторые замечания, касающиеся некоторых деталей конструкции мультиплексора, играющих важную роль в выполнении условий фильтрации (сложения в фазе компонентов сигнала на выходе) поясняемых рис. 2.6, в именно:

-входы массива световодов (выходные порты входного разветвителя) лежат на окружности решетки волноводов ОРВ (grating circle) радиуса R с центром в точке входа центрального входного волновода;

-входы других входных волноводов лежат на окружности (вписанной в ОРВ между ее центром и точкой касания общей касательной) диаметра R; эта окружность называется кругом Роуленда;

-шаг распределения входных ОВ и массива световодов постоянен в направлении касательных в точках, между которыми вписан круг Роуленда;

-длина дуги ОРВ, занимаемая входами массива световодов, должна быть много меньше R;

-при соблюдении вышеперечисленного длина пути между любым входом входного разветвителя и его любыми двумя последовательными выходными портами постоянна;

-при соблюдении вышеперечисленного диапазон FSR примерно постоянен и не зависит от выбора пары вход-выход (i-j) мультиплексора.

Для сокращения размеров мультиплексора вдвое и экономии компонентов можно использовать схему Литтроу для компоновки мультиплексора, разрезав его схему на рис. 2.6,б пополам и поместив в плоскости разреза зеркало (см. рис. 2.6,а). Потоки несущих с выхода массива световодов будут отражаться зеркалом и подаваться со стороны внутренних выходных портов единственного разветвителя в тот же волновод разветвителя, где будет происходить интерференция входных и отраженных волн. Входной порт должен размещаться при этом в центральном входном порту разветвителя.

Технология трехмерного оптического мультиплексирования (3DO).

3DO технология также использует классическую схему с плоской отражательной дифракционной решеткой (1), вогнутым зеркалом (2) и массивом волокон (3) (см. рисунок 2.7), размещенных в пазах решетки с фиксированным шагом. Схема работы (в режиме демультиплексора) проста: мультиплексированный поток из входного волокна (А), расходясь конусом с углом, (отражается от зеркала и падает на дифракционную решетку, отражающую под разными углами свет разной длины волны. Эти дифрагированные лучи, отражаясь от зеркала, фокусируются в определенных точках, где и должны быть расположены приемные порты массива волокон, выделяющих соответствующие несущие. Для примера показано выделение одного такого канала, конус лучей которого (с тем же углом () фокусируется в точке В (порте выходного волокна).

Все элементы конструкции строго фиксированы в стеклянном блоке (4), что позволяет выдержать и сохранять высокую точность изготовления. Указанная конструкция может быть использована как с параболическим, так и сферическим зеркалами, имеет коэффициент увеличения равный 1. Она афокальна (т.е. не имеет фокуса), так что все исходящие и входящие в волокна углы одинаковы. ОМ волокна укладываются в канавки специальной решетки. Конструкция позволяет использовать до 131 канала с шагом 1 нм или до 262 каналов с шагом 0,5 нм.

Во всех указанных решениях процедура мультиплексирования предполагается обратной по отношению к рассмотренной процедуре демультиплексирования. Параметры мультиплексоров WDM, реализованных на основе указанных технологий, сведены в таблицу, приведенную ниже.

Таблица 2.1 Сравнение различных технологий оптического мультиплексирования.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Технология | I/O AWG | I/O CG | 3-D Optics |
| Максимальное число каналов | 32 | 78 | 262 |
| Разнос каналов (нм) | 0,1 – 15 | 1 - 4 | 0,4 – 250 |
| Вносимые потери (дБ) | 6 – 8 | 10 - 16 | 2 – 6 |
| Переходное затухание (дБ) | -5- -29 | -7 - -30 | -30 - -55 |
| Чувствительность к поляризации, % | 2 | 2 - 50 | 0 |

Из таблицы 2.1 видно, что технология 3-D Optics WDM имеет преимущество по четырем из пяти параметров и может быть использована в системах WDM до уровня HDWDM с разносом каналов не меньше 0,4 нм.

**2.3 Источники излучения. Лазерные диоды**

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

Лазерные диоды с резонатором Фабри–Перо (FP-лазеры).

Резонатор в таком лазерном диоде образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, вывод излучения наружу. Для усиления света определенной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению 2D = Nл, где D - диаметр резонатора Фабри-Перо, а N - некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излучением. Если этот диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область Дл0,5 могут попасть два или более соседних максимумов, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нм. FP лазер имеет далеко не самые высокие технические характеристики, но для тех приложений, где не требуется очень высокая скорость передачи данных, он, в силу более простой конструкции, наилучшим образом подходит с точки зрения цена-эффективность.

Следует отметить, что даже в том случае, когда соседние максимумы малы, то есть когда реализуется одномодовый режим излучения и Дл мало, с ростом скорости передачи у FP лазера наблюдается перераспределение мощности в модах, которое приводит к паразитному эффекту - динамическому уширению спектра Дл (до 10 нм при частоте модуляции 1-2 ГГц). Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других более совершенных типов лазерных диодов, отличающихся способом организации оптического резонатора, и являющихся в некоторой степени модернизацией простого резонатора Фабри-Перо.

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер).

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

Лазерный диод с внешним резонатором (ЕС лазер).

В ЕС лазерах один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза. Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, - это эквивалентно изменению шага решетки - можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 нм. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

**2.4 Реализация усилителей EDFA**

Рассмотрим более подробно простую реализацию EDFA. Ее можно представить в виде следующей схемы,

Схема состоит из двухканального волнового мультиплексора WDM (оптического развет-вителя), к одному каналу которого подключено через оптический фильтр-изолятор ОФИ-1 волокно - источник информационного сигнала 1550 нм, к другому - лазерный диод накачки ЛД, генерирующий сонаправяенную волну накачки 980 или 1480 нм. С выхода мультиплексора сигнал подается в кольцо специального ОВ, легированного эрбием. Длина волокна в кольце 15-20 м. Усиленный в кольце сигнал 1550 нм является выходным сигналом усилителя, который снова подается в волокно через оптический изолятор ОФИ-2. Дополнительные оптические фильтры-изоляторы на обоих концах легированного ОВ ставятся для предотвращения распространения света в обратном направлении, которое может привести к осцилляции излучения лазера.

Практические ОУ имеют некоторые особенности, которые не видны из этой схемы :

- легированное ОВ имеет меньший диаметр сердечника (порядка 2 мкм), чем стандартное ОМ ОВ, для увеличения плотности пучка благодаря сужению на переходе из стандартного в легированное ОВ, что позволяет увеличить эффективность процессов возбуждения и усиления;

- допускается большое затухание легированного ОВ (порядка 10 дБ/км), вызванное значительной концентрацией примеси;

- используется как сонаправленное, так и противонаправленное включение пучка накачки, последнее позволяет примерно на 2 дБ увеличить усиление (при этом примерно на 1 дБ увеличивается шум);

- для получения более устойчивой работы лазера накачки (отсутствие осцилляции) используются специальные фильтры-стабилизаторы на основе, например, оптоволоконной решетки Брэгга\*;

- для получения более широкой полосы усиления и уменьшения неравномерности коэффициента усиления (создания "плоской" волновой характеристики") в них используются специальные выравнивающие устройства, например оптоволоконные решетки Брэгга; для увеличения усиления наряду с однокаскадными ОУ с одним лазером накачки разрабатываются и выпускаются ОУ с двумя лазерами накачки (которые теоретически можно рассматривать как двухкаскадные при наличии двойного комплекта основных блоков), а также двух-каскадные усилители с дополнительным выходом/входом между каскадами.

Практическая реализация оптических усилителей.

Только два типа усилителей нашли в настоящее время широкое применение в оптических сетях связи, это ППОУ и EDFA.

Указанные ОУ по функциональному назначению можно разбить на четыре группы :

- мощные усилители - МУ (бустеры), устанавливаемые непосредственно за передатчиком; их особенность в том, что они работают с большим сигналом на входе, обеспечивают максимально допустимое усиление и высокий уровень сигнала на выходе (-10 дБм и выше) и не критичны к уровню шумов;

- линейные усилители - ЛУ, устанавливаемые на линии в качестве повторителей; их особенность в том, что они работают с сигналом среднего уровня на входе, обеспечивают необходимый уровень сигнала на выходе и критичны к уровню шумов, который ограничивает общую длину регенерационного участка системы;

- предусилители - ПУ, устанавливаемые непосредственно перед приемником; их особенность в том, что они работают с сигналами очень низкого уровня (от -45 до -30 дБм) и потому очень критичны к уровню шума усилителя;

Указанные типы ОУ, их обозначения и положение в схеме оптической системы связи показаны ниже:

В свою очередь, ЛУ делятся на ЛУ первого поколения, ЛУ-I, и ЛУ второго поколения, ЛУ-Н. ЛУ-I может быть однокаскадным или двухкаскадным, но он не имеет дополнительного входа между каскадами. ЛУ-П - Двухкаскадный и имеет такой вход, что дает возможность для его более гибкого функционального использования: позволяет осуществлять внутреннюю коммутацию и различные функциональные преобразования (например, компенсацию УСИ, установку модуля компенсации дисперсии, ввод/вывод одного из усиливаемых каналов в системах WDM и др.). Это дает возможность уменьшить количество или номенклатуру используемого оборудования, а значит, и упростить возможное решение.

**2.5 Выбор оптического волокна для проектируемой ВОЛС**

Волокно SF. В начале 80-х годов передатчики на длину волны 1550 нм имели очень высокую цену и низкую надежность и не могли конкурировать на рынке с передатчиками на длину волны 1300 нм. Поэтому стандартное ступенчатое волокно SF (рис. 2.13 а) стало первым коммерческим волокном и сейчас наиболее широко распространено в телекоммуникационных сетях. Оно оптимизировано по дисперсии для работы в окне 1310 нм, хотя и дает меньшее затухание в окне 1550 нм.

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

Дальнейшие исследования подтверждают ограниченные возможности DSF при использовании в системах WDM. Чтобы избежать нелинейных эффектов при использовании DSF в WDM системах, следует вводить сигнал меньшей мощности в волокно, увеличивать расстояние между каналами и избегать передачи парных каналов (симметричных относительно λ0).

Четырехволновое смешивание - это эффект, приводящий к рассеянию двух волн с образованием новых нежелательных длин волн. Новые волны могут приводить к деградации распространяемого оптического сигнала, интерферируя с ним, или перекачивать мощность из полезного волнового канала. Именно из-за эффекта четырехволнового смешивания стало ясно, что необходимо разработать новый тип волокна, в котором λ0 располагалось бы вдали, то есть, по одну сторону (левее или правее) от всех возможных каналов.

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

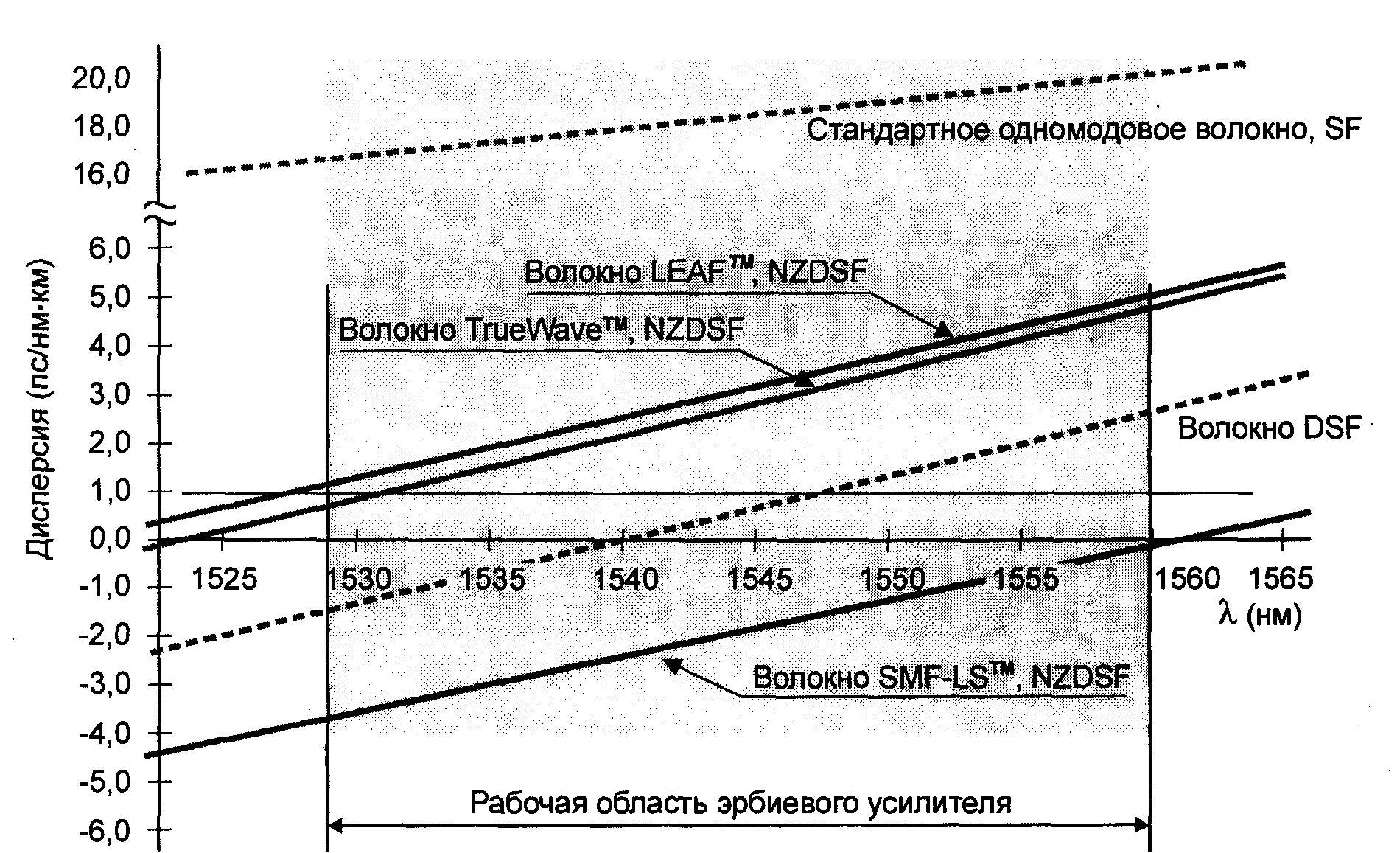


Рисунок 2.14 Хроматическая дисперсия волокон в окне 1550 нм.

Две марки л- смещенного волокна, появившиеся несколько лет назад, широко используются сегодня:

- волокно True Wave фирмы Lucent Tec., и волокно SMF-LS фирмы Corning. Оба имеют ненулевую дисперсию во всем диапазоне полосы пропускания эрбия. Волокно True Wave обеспечивает положительную дисперсию при точке нулевой дисперсии в районе 1523 нм, в то время как SMF-LS обеспечивает отрицательную дисперсию с точкой нулевой дисперсией чуть выше 1560 нм. В начале 1998 года фирма Corning выпустила еще одну марку л- смещенного волокна – LEAFтм.

Сравнительный анализ основных характеристик волокон True Wave, SMF-LS и LEAFтм приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Основные характеристики одномодовых волокон.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Характеристики | SMF-28 | True –Wave | SMF-LS | LEAFтм |
| Max.затухание на длине волны 1550нм(дБ/км) | ≤ 0.20 | ≤ 0,20 | ≤ 0.25 | ≤ 0.20 |
| Затухание на сухом стыке (дБ) при1550 нм | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 | н/д |
| Хроматическая дисперсия в зоне ненулевой дисперсии | | | | |
| Min (пс/нм\*км) | н/д | 0.8 | н/д | 1 |
| Max(пс/нм\*км) | 20 | 4.6 | -3.5 | 6 |
| Наклон ненулевой дис-персии S0 (пс/(нм 2\*нм) | н/д | ≤ 0.095 | ≤ 0.092 | н/д |
| Длина волны ненулевой дисперсии л0 (нм) | н/д | ≤ 1540 | ≥ 1560 | н/д |
| Диаметр поля моды (нм) при 1500нм | 10.5 ± 1.06 | 8.4 ± 0.6 | 8.4 ± 0.5 | 9.5 ± 0.5 |
| Кабельная длина волны отсечки лccf (нм) | н/д | ≤ 1260 | ≤ 1260 | н/д |
| Поляризационая модовая дисперсия (пс/√км) | ≤ 0.5 при  1550 нм | ≤ 0.5 при  1550 нм | ≤ 0.5 при  1550 нм | ≤ 0.08 |

н/д- нет данных

По дисперсионнным характеристикам волокно LEAF близко к волокну True Wave. Главной отличительной чертой этого волокна по сравнению с тремя предыдущими является большая эффективная площадь для светового потока – диаметр модового поля возрос на 1 мкм. Величина этого параметра становится весьма важной для оптимизации систем диапазона 1550 нм. Больший диаметр медового пятна позволяет увеличить уровень мощности излучения вводимого волокна на 2 дБ, сохраняя при этом влияние ряда нелинейных эффектов, в особенности четырехволнового смешивания, на прежнем уровне.

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

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

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

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

-использование волокон с компенсирующей дисперсией DCF (dispersion-compensating fibers). Положительная дисперсия, накопленная на одном участке с использованием стандартного волокна SF, может компенсироваться последующим примыкающим сегментом на основе волокна DCF с заранее подобранным значением отрицательной дисперсии, в результате чего итоговая хроматическая дисперсия может быть приближена к нулю. Компенсация хроматической дисперсии допустима в силу систематического характера накопления дисперсии с ростом длины;

-использование оптических лазерных передатчиков с очень узкой спектральной шириной (0,1 нм и менее), способных модулировать излучение на частотах в несколько ГГц;

-использование волокон типа NZDSF, в которых "сдвигается" длина волны нулевой дисперсии за пределы окна 1550 нм, в результате чего дисперсия становится достаточно большой, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, в то же время достаточно малой, чтобы поддерживать распространение сигнала высокой емкости (высокой частоты модуляции) на большие расстояния.

Сегменты на основе волокна SF без использования коррекции дисперсии допускают протяженность до 90 км (при скорости передачи 2,4 Гбит/с). Первые две методики коррекции дисперсии, применяясь отдельно друг от друга или в комбинации, позволяют увеличить протяженность сегментов до 140 км при сохранении прежней скорости передачи, табл. 2.3.

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

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

Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе SF, DSF и NZDSF приведены в таблице 2.3 а,б.

Таблица 2.3 Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе различных типов одномодовых волокон.

а) Передача 2.5 Гб/с сигнала по различным типам одномодовых волокон

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Усиление мощности сигнала на одной длине волны | | | | | | |
| Волок  Но | Коррекция дисперсии | Усилители EDFA | Число каналов | Емкость каналов | Длина пролета | Ограничения системы |
| SF | Нет | УМ | 1 | 2.4Гбит/с | 70-90  км | Мощность  Дисперсия |
| SF | Внешняя модуляция | УМ | 1 | 2.4Гбит/с | 140 км | Мощность |
| SF | Компенсация дисперсии | УМ | 1 | 2.4Гбит/с | 120-140  км | Мощность |
| DSF | Нет | УМ | 1 | 2.4Гбит/с | 120-140  км | Мощность |
| NZ DSF | л0выводится из зоны EDFA | УМ | 1 | 2.4Гбит/с | 120-140  км | Мощность |
| Линейное усиление многоканального сигнала | | | | | | |
| SF | Внешняя модуляция | УМ, ЛУ | 1,2,4,8 | 2.4-20  Гбит/с | >500км | ASE,отсутс-  твует плато |
| SF | Компенсация дисперсии | УМ, ЛУ | 1,2,4,8 | 2.4-20  Гбит/с | >500км | ASE,отсутс-  твует плато |
| DSF | Нет | УМ, ЛУ | 1,2,4,8 | 2.4  Гбит/с | >500км | ASE,отсут.  плато, ЧВС |
| NZ DSF | л0выводится из зоны EDFA | УМ, ЛУ | 1,2,4,8 | 2.4-20  Гбит/с | >500км | ASE,отсутс-  твует плато |

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

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Усиление мощности сигнала на одной длине волны | | | | | | | |
| Волок  Но | | Коррекция дисперсии | Усилители EDFA | Число каналов | Емкость каналов | Длина пролета | Ограничения системы |
| SF | | Внешняя модуляция | ПУ | 1 | 10Гбит/с | 50-70  км | Дисперсия |
| SF | | Внешняя  мод-я + КД | УМ, ПУ | 1 | 10Гбит/с | 120-140  км | Мощность |
| DSF | | Внешняя модуляция | УМ, ПУ | 1 | 10Гбит/с | 120-150  км | Мощность |
| NZ DSF | | ВМ,л0выв-ся из зоны EDFA | УМ, ПУ | 1 | 10Гбит/с | 120-150  км | Мощность |
| Линейное усиление многоканального сигнала | | | | | | | |
| SF | Внешняя мод-я + КД\* | | УМ,ЛУ,ПУ | 1,2,4 | 10,20,40  Гбит/с | >300км | ASE,отсутс-  твует плато |
| DSF | Внешняя модуляция | | ЛУ, ПУ | 1нелин  эффект | 10  Гбит/с | >300км | ASE,отсут.  плато, ЧВС |
| NZ DSF | ВМ,л0выв-ся из зоны EDFA | | ЛУ, ПУ | 1,2,4,8 | 10,20,40  Гбит/с | >300км | ASE,отсут.  плато,SPM |

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

Обозначения: УМ – усиление мощности, ЛУ – линейное усиление, КД – компенсация дисперсии, ПУ – приемное усиление, ASE – спонтанно-усиленное излучение, ЧВС – четырехволновое смешивание, SPM – межфазная модуляция.

**3. Влияние дисперсии на параметры проектируемой ВОЛС**

Под дисперсией в оптике понимают зависимость фазовой скорости световых волн vф от частоты. Это же относится и к показателю преломления n2 - n1 = n (w).

В этом смысле дисперсия в объемной среде единственна и носит в оптике название хроматической дисперсии, подчеркивая факт разложения света на составляющие в хроматический спектр. Дисперсия называется нормальной (или положительной), если n увеличивается с увеличением частоты w, и аномальной (или отрицательной), если п уменьшается с увеличением w. Зависимость фазовой скорости от w (или л) для нормальной и аномальной дисперсий обратная.

Понятие "дисперсия" в световоде уже не единственно и приходится различать три ее вида:

-модовая дисперсия - дисперсия, существующая только в многомодовом волокне и вызванная различной скоростью распространения в световоде лучей разных мод, достигающих определенного сечения ОВ (выхода) в разное время, что приводит к уширению входного импульса на выходе;

-материальная дисперсия - дисперсия собственно материала световода, существующая независимо от типа волокна (ММ или ОМ) и отличающаяся от хроматической дисперсии только тем, что она соответствует волноводной (а не объемной) среде;

-волноводная дисперсия - дисперсия, существующая в так называемой волноводной cpeде, сформированной по меньшей мере двумя физическими средами (в нашем случае сердцевиной и оболочкой).

Модовая дисперсия.

Этот тип дисперсии может быть уменьшен двумя путями:

-уменьшением диаметра сердцевины dc ;

-изменением профиля показателя преломления, т.е. использованием многомодового волокна с плавно изменяемым показателем преломления. В настоящее время многомодовые волокна такого типа используются достаточно широко.

Материальная дисперсия.

Материальная дисперсии, или дисперсия материала, зависит (для прозрачного материала) от частоты w (или длины волны л) и материала ОВ, в качестве которого, как правило, используется кварцевое стекло. Дисперсия определяется электромагнитным взаимодействием волны со связанными электронами материала среды, которое носит, как правило, нелинейный (резонансный) характер и только вдали от резонансов может быть описано с приемлемой точностью, например уравнением Селлмейера :

n2(w)= 1+∑Rjw2j (w2j – w2), (3.1)

где wj - резонансные частоты, Rj - величина j-го резонанса, а суммирование по j для объемного кварцевого стекла ведется по первым трем резонансам.

Возникновение дисперсии в материале световода даже для одномодовых волокон обусловлено тем, что оптический источник, возбуждающий вход (светоизлучающий диод - СИД или лазерный диод - ЛД), формирует световые импульсы, имеющие непрерывный волновой спектр определенной ширины (например, для СИД это примерно 35-60 нм, для многомодовых ЛД (ММЛД) - 2-5 нм, для одномодовых ЛД (ОМЛД) - 0,01-0,02 нм. Различные спектральные компоненты импульса распространяются с разными скоростями и приходят в определенную точку (фазу формирования огибающей импульса) в разное время, приводя к уширению импульса на выходе и, при определенных условиях, к искажению его формы.

Для описания дисперсии в световоде используется разложение постоянной распространения моды в в ряд Тейлора в окрестности несущей частоты w0. Линейный член этого разложения, или параметр в1, характеризует групповую скорость движения огибающей импульса vг = с/пг (здесь пг - групповой показатель преломления), а квадратичный член, или параметр в2 характеризует собственно дисперсию групповых скоростей - ДГС в волокне, имеющую размерность [пс2/км]. Она и определяет уширение импульса. Интересно отметить, что в диапазоне длин волн 1500-1600 нм /?2 почти линейно уменьшается от +70 до -40 [пс2/км], см. рис. 9-4, принимая нулевое значение на длине волны примерно 1270 нм. Эта длина волны л0d называется длиной волны нулевой дисперсии для объемной среды. Для оптоволокна эта длина волны сдвигается до значения порядка 1312 нм (см. ниже), чем и объясняется использование источников излучения 1310 нм для одномодового ОВ. Для одномодового кварцевого волокна ДГС положительна для л<1312 нм и отрицательна для л >1312 нм, а в окрестности л=1312 нм она нулевая.

Из описанного ясно, что для уменьшения материальной дисперсии нужно, с одной стороны, переходить при выборе источников от оптических источников типа СИД к ЛД, а при выборе волокна от ММ к ОМ волокну. С другой стороны, необходимо переходить от источников с длинами волн порядка 850 нм к длинам волн порядка 1310 нм для использования эффекта нулевой дисперсии. Эти естественные "теоретические" соображения, не могут, однако, служить в качестве однозначной практической рекомендации. Так для ЛВС может оказаться более предпочтительным использовать СИД на длине волны 850 нм, работающий на ММ волокно.

Волноводная дисперсия.

Дисперсия реальных световодов отличается от дисперсии объемной среды наличием волноводной структуры, изменяющей эффективный показатель преломления моды. В результате появляется особая волноводная составляющая дисперсии, которая складывается определенным образом с дисперсией материала, формируя результирующую дисперсию. Вклад волноводной дисперсии зависит от радиуса сердцевины, разности показателей преломления сердцевины и оболочки и числа оболочек. Для описания дисперсии в световоде с учетом ее волноводной составляющей вместо параметра в2 используется дисперсионный параметр D:

D = -рc в2 / л2

В избежание путаницы, возникающей при чтении различных публикаций, нужно помнить, что для оптических волокон в справочниках в качестве дисперсионной характеристики приводят зависимость от л именно этого параметра D, имеющего размерность [пс/км/нм], а не [пс2/км], и знак противоположный знаку дисперсии групповых скоростей в2. Поэтому и наклон зависимости дисперсионного параметра D от л , называемый часто наклоном ненулевой дисперсии, будет положительным (а не отрицательным). А фразы в публикациях "в области положительных (или отрицательных) дисперсий" могут на самом деле иметь обратный смысл, так как дисперсия, по определению, положительна при положительном в2 (т.е. отрицательном, а не положительном, D). Эти фразы правильны, если иметь ввиду, что под дисперсией фактически понимается дисперсионный параметр D.

Действие волноводной составляющей дисперсии сдвигает длину волны нулевой дисперсии до величины л0d -1312 нм (рис. 3.2, кривая 1). Этот факт используется при выборе длины волны источника (1310 нм) для работы с одномодовыми ОВ. Используя несколько слоев оболочки (и тем самым изменяя параметры волноводного тракта), можно сдвинуть длину волны нулевой дисперсии в диапазон 1500-1600 нм. Для этого оказалось достаточным использовать две оболочки (рис.3.2, кривая 2) - этот тип оптоволокна получил название - оптоволокна со сдвигом дисперсии (DSF). Используя многослойную оболочку (рис.3.2, кривая 3 - оболочка имеет 4 слоя), можно добиться почти плоской и близкой к нулевой дисперсионной характеристики (D≤ 1-6 пс/км/нм) в диапазоне длин волн от 1300 до 1650 нм. Этот тип оптоволокна получил название – волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), который может с успехом использоваться в синхронных оптических системах SDH с мультиплексированием по длинам волн.

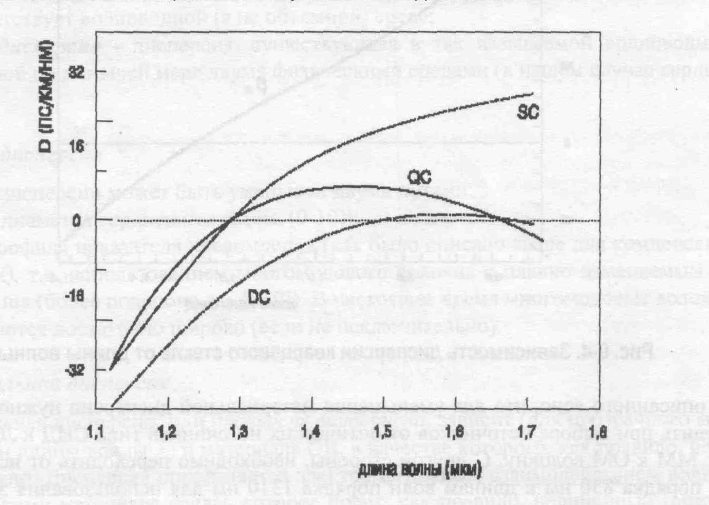


Рисунок 3.2 Зависимость дисперсии волокна D от длины волны волны и числа оболочек: SC – одна оболочка, DC – две оболочки, QS - четыре оболочки.

**3.1 Методы компенсации дисперсии**

Методы уменьшения дисперсии, рассмотренные выше, сводились к использованию профилированных показателей преломления, длины волны с нулевой дисперсией, сдвигу нулевой дисперсии за счет волноводной составляющей в область рабочих длин волн, созданию слабо меняющейся дисперсионной характеристики с ненулевой, но малой дисперсией. Они уже реализованы в существующих оптических волокнах.

Однако существует возможность и прямой компенсации дисперсии путем врезки в волокно, имеющее положительную дисперсию, участка ОВ с отрицательной дисперсией, причем так, чтобы результирующая дисперсия на заданной длине волны или (с учетом использования WDM) в определенном диапазоне длин волн была близка к нулю. Использование этого метода возможно упростит технологию изготовления кабеля и кажется достаточно перспективным.

Одной из промышленных разработок, основанных на такой технологии изготовления оптического волокна, является новая модификация кабеля TrueWave, названная TrueWave Balanced. Этот кабель позволяет без использования внешних компенсаторов передавать сигналы высокоскоростных систем WDM (DWDM и HDWDM ) в стандартном для них в настоящее время диапазоне длин волн 1530-1565.

Кроме указанных спецтехнологий , для этих же целей был разработан специальный тип оптического волокна DCF – волокно компенсирующее дисперсию (ВКД), которое в виде бухты ОВ определенной длины может быть вставлено в виде модуля в стойку с аппаратурой SDH или WDM. Важно иметь в виду большой уровень вносимых потерь, который имеет такой модуль.

**3.2 Выбор волокна для компенсации дисперсии**

Как уже отмечалось, согласно статистике, наибольший процент уложенного кабеля содержит стандартное ОМ волокно, имеющее большую величину хроматической дисперсии, 17-20 пс/(нм-нм), на длине волны 1550 нм. Если планируется увеличить длину перекрытия или секции, ограниченную допустимой величиной накопленной дисперсии, или необходимо уменьшить дисперсию в связи с переходом со скорости передачи 2,5 Гбит/с на 10 Гбит/с, или планируется использование систем WDM, или же, наконец, оказывается необходимым установить солитонные генераторы для повышения надежности работы вашей линии связи (а для нормальной работы таких генераторов требуется, как известно, отрицательная средняя (накопленная на длине секции) дисперсия - можно использовать специальное волокно для компенсации дисперсии - ВКД (DCF). Это волокно производится рядом компаний, например, Corning, Lucent Technologies, Sumitomo Electric.

Волокно укладывается (в виде бухты) в специальные модули - модули компенсации дисперсии - МКД (DCM), выпускаемые как в виде отдельно используемых модулей, оснащенных оконцованными коннекторами монтажными шнурами (типа - pigtail), так и в виде модулей, монтируемых в стойках. Размер модулей могут быть разными, например, для DCM Corning имеем: тип В - 235x235x40 мм, тип D - 267x267x40 мм и тип С - 278x432x44 мм; для DCFM Sumitomo: 228x202x41 мм.

В табл. 2.4 приведены доступные типы и параметры такого модуля (волокна), выпускаемой компаниями Corning. Приведенные параметры соответствуют длине волны 1545-1550 нм, а среднее значение PMD измерено в диапазоне длин волн 1500 - 1565 нм. В этой таблице фактически вместо дисперсии используется дисперсионный параметр D. Под "эффективностью модуля" понимается отношение дисперсии модуля к вносимому затуханию.

Таблица 2.4 Параметры модулей компенсации дисперсии.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Компания | Corning | |
| Тип модуля | DCM-95 | DCM-110 |
| Компенсируемая длина линии, км | 95 | 110 |
| Дисперсия волокна модуля, пс/нм/км | -1564±15 | 1756±15 |
| Вносимое затухание, дБ | >10 | >10 |
| Эффективность модуля, пс/нм/дБ | 156,4 | 175,6 |
| Среднее значение PMD, пс | >1.6 | <1.7 |

В практике использования волокна существуют два подхода в стремлении уменьшить накопленную дисперсию на длине секции. Один базируется на использовании волокна с малой дисперсией (волокна с нулевой дисперсией, если речь идет об использовании одной несущей, или волокна NZDSF с минимально-возможным наклоном кривой дисперсии в рабочем окне, если речь идет об использовании нескольких несущих в системах с WDM), другое - на использовании чередующихся участков с положительной и отрицательной дисперсией (параметром D). Второй подход (в силу неоднородности используемого волокна в сети и вытекающих из этого сложностей в случае ремонта) подвергался критике. Однако он был дешевле. С появлением промышленных МКД, а также учитывая, что установка МКД носит не "распределенный" (как для ВОК), а "сосредоточенный" характер (модуль устанавливается в стойку, или на полку (в шасси) ОУ между первым и вторым каскадам» усиления, сложности "с ремонтом" исчезли. В результате все более широкое применение находит связка: волокно SSF+DCM (стандартное волокно + МКД). У такого решения два недостатка (как это из таблицы 2.4); дополнительные вносимые потери, которые должны быть учтены при подсчете накопленного затухания, и увеличение суммарного PMD, которое должно быть учтено для высокоскоростных систем ( 10 Гб/с на несущую и выше ) при подсчете накопленного PMD.

В любом случае при использовании МДК необходимо проводить проверочные расчеты не только накопленного затухания с учетом вносимых потерь, но и накопленного значения PMD, особенно для высокоскоростных систем.

**4 Расчет длины регенерационного участка**

**4.1 Протяженность линии. Расчет длины регенерационного участка с учетом хроматической дисперсии**

Соотношение сигнал/шум. В табл. 2.5 приведены основные параметры оптических спецификаций для стандартов STM-16 и STM-64. Как видно, система STM-64 предъявляет более высокие требования к соотношению сигнал/шум, превышая на 5-10 дБ этот параметр для STM-16, что ведет к меньшему допустимому числу усилителей EDFA между регенераторами STM-64.

Таблица 2.5 Основные параметры оптических спецификаций стандартов STM-16 и STM-64.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметры | STM-16  (2,5 Гбит/с) | STM-64  (10 Гбит/с) |
| Минимальное отношение сигнал/шум, дБ | 18-21 | 27-31 |
| Допустимая дисперсия в кабельной системе, пс/нм | 10500 | 1600 |
| Ограничения из-за PMD | Нет | < 400 км |

Рассчитаем длину регенерационного участка ограниченного хроматической дисперсией для стандарта STM-16. Для волокон SF и NZDSF возьмем значения удельной дисперсии 20 и 5,5 пс/(нм\*км) соответственно. Отсюда,

Lдисп = ф / D,

где ф -допустимая дисперсия в кабельной системе, пс/нм, D - значения удельной дисперсии пс/(нм\*км)

Lдисп = 10500 / 20 = 525 км, для SF волокна.

Lдисп = 10500 / 5.5 = 1909 км, для NZDSF волокна.

Рассчитаем длину регенерационного участка ограниченного хроматической дисперсией для стандарта STM-64.

Lдисп = 1600 / 20 = 80 км, для SF волокна.

Lдисп = 1600 / 5.5 = 290 км, для NZDSF волокна.

Хроматическая дисперсия. STM-16 допускает значительно большую дисперсию сигнала в линии, чем STM-64, что дает выигрыш как в протяженности сегментов между последовательными оптическими усилителями, так и в общей протяженности линии между регенераторами. Благодаря линейности хроматической дисперсии, можно добиться значительного увеличения длин, указанных в таблице, используя вставки фрагментов ВОК на основе волокна с компенсирующей дисперсией.

Таблица 2.6 Ограничение общей протяженности из-за влияния хроматической дисперсии.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип волокна | STM-16 | STM-64 |
| Стандартное одномодовое волокно SF, км | 525 | 80 |
| Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF, км | 1909 | 290 |

При моделировании ВОЛС длиной 550км, дисперсионная длина является ограничением для системы при использовании стандартного одномодового волокна (SF), и не является ограничением системы при использовании NZDSF волокон.

**4.2 Расчет длины регенерационного участка с учетом поляризационно-модовой дисперсией (PMD)**

Проведем оценку влияния PMD на передачу каналов STM-16 и STM-64. В рамках промышленных требований, PMD не должна превышать 1/10 битового интервала. Отсюда значения накопленной поляризационной модовой дисперсии не должны превышать 40 пс и 10 пс для линий STM-16 и STM-64 соответственно. Величина PMD по прохождению светом длины L определяется по формуле ф = T\*L1/2, где Т- удельная поляризационная модовая дисперсия. При Т= 0,5 пс/км1/2 (для волокон NZDSF - TrueWave™ и SMF-LS™, см. табл. 2.2) получаем для линий STM-16 и STM-64 предельные протяженности между регенераторами:

L = ф2 / T2 = 402 / 0.52 = 6400 км, для линии STM-16.

L = 102 / 0.52 = 400 км, для линии STM-64.

Первое ограничение так велико, что дело до него не доходит. Заметим, что в отличии от хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия не компенсируется. Поэтому уменьшить этот параметр можно только используя новые волокна, например NZDSF - LEAF™, для которого

Т< 0,08 пс/км1/2 .

При моделировании ВОЛС длиной 550км, PMD для стандарта STM-16 не является ограничением для системы, влияние PMD необходимо учитывать при проектировании линий связи начиная со скорости 10 Гбит и выше.

Трибные интерфейсы.

Хотя волокно обеспечивает огромную полосу пропускания, каналы доступа обычно рассчитаны на меньшую скорость. Терминалы STM-64 разработаны для создания стержневых магистралей и допускают подключение менее скоростных потоков синхронной цифровой иерархии только двух типов: STM-4 и STM-16. В случае необходимости организации доступа по менее скоростным каналам, например на основе STM-1 или на основе трибных интерфейсов плезиохронной иерархии Е1, Е2, ЕЗ и т. д., наряду с терминалом STM-64 потребуется дополнительный отдельный сетевой элемент, который будет связываться с терминалом STM-64 по каналу STM-4 или STM-16. В то же время сетевые элементы на каналы STM-16 и более низкие допускают реализацию прямого доступа.

Таблица 8.8 Допустимые низкоскоростные интерфейсы для терминалов STM-16 и STM-64.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Интерфейсы | STM-16 | STM-64  (9953,280 Мбит/с) |
| Возможность ввода/вывода каналов | Да | Нет |
| STM-16 (2488,320 Мбит/с) | - | Да |
| STM-4 (622,488 Мбит/с) | Да | Да |
| STM-1 (155,520 Мбит/с) | Да | Нет |
| ЕЗ (34,368 Мбит/с) | Да | Нет |
| Е1 (2,048 Мбит/с) | Да | Нет |

# **4.3 Расчет эксплуатационного запаса по затуханию**

По принятым нормам эксплуатационный запас на деградацию системы аз ≥ 6дб. 3дб – на станционный запас и 3дб – линейный запас.

На выходе источника излучения имеем мощность сигнала – 1мВт (0дбм). Затухание сигнала в модуляторе составляет бмод = 5дб, в мультиплексоре бmux = 6дб. Стандартные данные взяты из промышленного оборудования.

При расчете эксплуатационного запаса системы будем исходить из того, что уровень сигнала на выходе усилителя должен примерно равняться переданной мощности, т.е. усилитель должен компенсировать потерянную мощность в элементах ВОЛС, в волокне, в разьемных и неразьемных соединителях, иметь бст = 3дб станционный запас на всю систему и блин = 3дб линейный запас на каждом пролете.

Исходя из этого определим минимальный коэффициент усиления усилителя мощности – УМ.

Затухание сигнала в модуляторе составляет – 5дб, в мультиплексоре – 6дб. Включим сюда 3дб станционный запас и учтем, что довольно большая мощность теряется при вводе излучения в волокно – би-в =0.5-1 дб. Отсюда определим, что минимальный коэффициент усиления УМ – G должен быть:

G = бмод + бmux + би-в + бст,

G = 5дб + 6дб + 3дб +1дб = 15дб.

Получили – 15дб. Для уверенной передачи берем – 16 дб.

Произведем расчет коэффициента усиления линейного усилителя – ЛУ. Затухание в волокне длиной в L = 110 км (при бв = 0,20дб/км, берем из таблицы 2.2) составляет:

бв110 = L \* бв,

бв = 110км \* 0,20дб/км = 22дб.

Рассчитаем число нераземных соединений по формуле:

nн = L/lc –1,

где lc – строительная длина (lc = 6 ),

nн = L/lc –1 = 18

Затухание на неразьемных соедининиях определим по формуле:

бн = nн \* б 1н,

где б 1н = 0,05дб – затухание на одном нераземном соединении,

бн = 18\*0.05 = 0.9дб.

Число разьемных соединений – 2. б 1р = 0,5 – потери на одном разьемном соединении. б р = 1дб.

Таким образом затухание на 1 пролете (б пр) составляет:

б пр = б в + б р + б н,

б пр = 22+0,9+0,1= 23дб, приплюсуем сюда3дб на линейный запас, отсюда имеем коэффициент усиления ЛУ должен быть:

G = бв + бп + бн + блин,

G = 23дб + 3дб = 26дб.

Для обеспечения необходимой мощности сигнала на входе в приемник коэффициент усиления предусилителя – ПУ, берем порядка 30дб, т. к. мощность сигнала на выходе волокна очень низкая и необходимо учесть, что в демультиплексоре затухание сигнала составляет ~ 6дб. Тем самым мы обеспечиваем необходимую мощность для детектирования сигнала, которая для интерфейса STM-16 составляет -10 - -20дбм.

Из полученных данных при моделировании ВОЛС на САПРе LinkSim для максимального приближения к реальной линии б – коэффициент затухания в волокне берем равным 0,25дб/км.

**4.4 Расчет длины волокна компенсации дисперсии**

При использовании стандартного одномодового волокна ограничением для системы длиной в 550км является дисперсия. Эту проблему решают используя волокно компенсирующее дисперсию – ВКД. ВКД будем устанавливать после каждого пролета между 1 и 2-м каскадом усилителя.

Произведем расчет необходимой длины – ВКД.

При прохождении сигналом пролета набег хроматической дисперсии составляет:

ф = D \* L,

ф = 20 пс\*нм/км \* 110км = 2200пс\*нм.

Для компенсации накопленной дисперсии будем использовать модуль компенсации дисперсии – МДК – DCM-95(см. таблицу 2.4).

Дисперсионный параметр МКД D = - 1564±15пс\*нм/км.

После прохождения сигналом МКД дисперсия будет составлять

D′= 2200-1564 = 636 пс\*нм, что сравнимо с дисперсией накопленной в NZDSF в волокне (дисперсия составляет ~ 7 пс\*нм/км). Таким образом, при использовании 1 км ВКД после каждого линейного усилителя обеспечивается необходимый уровень накопленной хроматической дисперсии.

Проведенный расчет показал возможность использования стандартного одномодового волокна (SF) в проектируемой ВОЛС длиной регенерационного участка 550км. Ограничение длины в следствии хроматической дисперсии решается используя волокно компенсирующее дисперсию.

## **5. Моделирование 8-ми канальной DWDM линии с применением системы автоматизированнного проектирования LinkSim**

LinkSim представляет оптическую систему связи как связанный набор блоков, каждый из которых является компонентом или подсистемой в системе связи. Аналогично тому, как в фактической системе связи физические сигналы проходят через компоненты линии связи, при моделировании в LinkSim данные сигнала проходят через модели компонентов. Каждый блок (модель) моделируется независимо, используя параметры, указанные пользователем для данного блока. Информация о сигнале проходит в данный блок из других блоков. Такой метод моделирования называется блочно-ориентированным. В LinkSim эти блоки графически представлены как иконки. Внутренне, они представляют собой структуры данных и сложные числовые алгоритмы.

LinkSIM обеспечивает иерархическую объектно-ориентированную среду расположения топологии для непосредственного формирования рисунка линейной топологии. Чтобы смоделировать необходимую топологию, из инструментальной панели можно легко отобрать необходимые оптические компоненты линии: генераторы псевдослучайных двоичных последовательностей, лазеры, модуляторы, волокно, оптические усилители, аттенюаторы, фильтры, приемники и др., добавить к уже расположенным и соединить вместе при помощи "мыши".

Каждый компонент, представленный иконкой в топологической схеме имеет собственный набор параметров, который может быть вызван при помощи правой кнопки мыши. Параметры могут включать как численные значения, например, длина волны лазера или диаметр волокна, так и различные уже установленные типы, например, типы фильтров.

При каждом последующем моделировании и анализе в LinkSim по возможности используются предварительно вычисленные результаты. Данный алгоритм заключается в том, что в процессе моделирования линии, моделируются только те компоненты, на которые повлияли внесённые пользователем изменения переменных, что позволяет проводить эффективный по времени анализ результатов.

В LinkSim поддерживаются статистические изменения составляющих параметров. Каждый числовой составляющий параметр может иметь индивидуально определенную функцию вероятности и среднеквадратичное отклонение. Анализ параметров, изменяющихся согласно их статистике, может быть сделан указанное число раз. Многократный анализ может использоваться, для определения диапазона ожидаемых статистических изменений для данной линии связи. Эта информация может быть использована проектировщиком для уточнения проектных параметров.

Пользователь может получить итоговую информацию о сигнале в любой точке топологической схемы в процессе моделирования или после его завершения.

Каждая модель в LinkSim представлена в виде иконки в средней части левой инструментальной панели. Левая сторона иконки соответствует входным сигналам модели, правая сторона иконки соответствует выходным сигналам модели. Некоторые модели генерируют графики или файлы результатов выходных сигналов.

Модели разделяются на пять общих категорий: модели передатчика, модели канала, модели приемника, модели контроля и модели анализа. Передатчик, канал и приемник представляют модели, включающие компоненты соответствующих блоков оптической линии связи. Модели контроля - специальные модели, которые осуществляют функции, помогающие управлять моделированием и оперировать данными сигнала в процессе моделирования. Модели анализа проводят исследования результатов и генерируют графики результатов. Ниже приведено краткое описание моделей и их параметров, используемых в этой работе.

## Моделирование 8-ми канальной DWDM линии при помощи системы автоматизированного проектирования LinkSim.

Рассмотрим модель 8-ми канальной DWDM оптической сети.

Эта схема представляет собой 8-ми канальную DWDM систему, которая содержит следуещие блоки:

Блок PRBS (генератора псевдослучайной последовательности) генерирует на выходе четыре отдельных двоичных последовательности. В этом блоке можно менять битовую скорость и длину волны CW лазера. Благодаря этому можно, в зависимости от длины волны излучения и скорости передачи, просматривать параметры BER.

Блок MUX (мультиплексора) осуществляет слияние восьми отдельных оптических канала в единый оптический канал. Также в состав блока MUX входит оптический фильтр с частотной характеристикой трапециидальной формы, с одинаковым зазором частоты между их центрами. В этом блоке также предусмотрены и оптические потери.

Блок Усилителя (предусилители, усилители мощности, линейнные усилители EDFA). Обеспечивает усиление сигнала до нужной величины. В этом блоке предусмотрены коэффициент усиления, мощность насыщения усилителя.

Волокно здесь можно задать почти все характеристики волокна такие как затухание, длину, диаметр, коэффициенты дисперсии показатели преломления и тд.

Выход линии подключён к блоку (демультиплексора). DEMUX разделяет оптический канал на восемь каналов. В DEMUX используются фильтры с теми же параметрами, как в MUX. Оптический сигнал с выхода DEMUX идёт к блоку приемника. Модель приемника преобразует оптическую входную мощность в электрический поток, усиливает и преобразует форму сигнала. Электрический сигнал с выхода модели приемника передается BER-тестеру. Этот блок использует форму сигнала и зависящий от времени шум, который сопровождает его для определения средней частоты передачи ошибочных битов. Блок BER автоматически определяет идеальное время выборки и порог срабатывания исходя из формы входного сигнала. Для каждого бита в последовательности определяется вероятность ошибки исходя из уровня сигнала, уровня шума и двоичного значения сигнала (двоичный сигнал от генератора псевдослучайной последовательности) во время выборки. Затем, исходя из средней вероятности ошибки передачи каждого из битов в последовательности, определяется средняя частота передачи ошибочных битов.

## Исследование ВОЛС и ее характеристик

В системе автоматизированного проектирования LinkSim строим модель 8-ми канальной WDM – линии (см. рисунок 2.7). Исследуем прохождение сигнала по линии.

## **5.1 Описание компонентов ВОЛС и их параметров**

*Генератор псевдослучайной двоичной последовательности (PRBS)*

Эта модель генерирует двоичную последовательность нескольких различных типов. Используя только одну модель PRBS можно обеспечить многократные выходные сигналы, ввести различные каналы WDM или параллельной оптической шины. Каждый канал может иметь собственную модель PRBS, каждая из которых сконфигурирована различным образом. Различные типы модели описаны согласно их имени в списке параметров пользователя:

PRBS: Производит максимально длинную псевдослучайную двоичную последовательность.

Параметры PRBS генератора, определяемые пользователем:

BitRate: Скорость передачи информации в битах сгенерированной двоич-ной последовательности =25\*109 Биты / двоичная последовательность

PatternLength: Число битов в сгенерированной последовательности - 2x,

где x - значение параметра =6 2 ^ x биты

PreBits: Число нулевых битов в начале последовательности =2

Postbits: Число нулевых битов в конце последовательности =3

DF 1\*1011;

F1 1.952\*1014 Гц;

F2 F1+DF = 1.953\*1014 Гц;

F3 F1+2\*DF = 1.954\*1014 Гц;

F4 F1+3\*DF = 1.955\*1014 Гц;

F5 F1+3\*DF = 1.956\*1014 Гц;

F6 F1+3\*DF = 1.957\*1014 Гц

F7 F1+3\*DF = 1.958\*1014 Гц;

F8 F1+3\*DF = 1.959\*1014 Гц;

Patternlenght =6

Point sperbit =5

***Генератор сигнала (Signal generator)***

Эта модель преобразует входной двоичный сигнал в выходной электрический сигнал. Для конфигурации электрического выходного сигнала используются пользовательские параметры.

Параметры генератора электрического сигнала, определяемые пользователем:

Upk - Пиковое напряжение выходного электрического сигнала двоичной последовательности =2В;

Umin - Минимальное напряжение выходного электрического сигнала двоичной последовательности =0В;

Тип модели, используемой для генерирования сигнала - On\_off\_ramp;

F0 - Резонансная частота кольцевого фильтра =20\*109 Гц;

Тип фильтра - RingFilter (кольцевой фильтр);

γ -излучение: Демпфирование частоты кольцевого фильтра =7.69\*109 рад/с;

Тип модуляции - NRZ

Tr - Время нарастания выходного электрического сигнала =40\*10-12 с;

Tf - Время спада выходного электрического сигнала =40\*10-12 c.

***CW лазер***

Эта модель производит оптический сигнал с CW лазера и предназначена для использования совместно с моделью модулятора.

Эта модель обеспечивает два различных типа выходного оптического сигнала. Для топологии, в которой модель CW лазера обеспечивает прямой вход к модели модулятора, наиболее удобно представление сигнала по его мощности. Для топологии, в которой выход CW лазера используется как вход к другим составляющим моделям, должно использоваться временное представление сигнала. Чтобы наиболее полно использовать эту возможность должны быть установлены параметры timeStep и noSamples для согласования интенсивности замеров и числа точек в данном сигнале с любыми другими сигналами, с которыми данный сигнал взаимодействует при моделировании.

Пользователь может также установить фазу выходного оптического сигнала.

Параметры лазера, определяемые пользователем:

RIN: Относительный шум интенсивности лазера = -150 дБ/Гц;

PeakPower: Пиковая мощность (средняя мощность для CW лазера) =1\*10-3 Вт;

Длина волны: Длина волны, на которой работает лазер =1.55\*10-9 м;

***Электрооптический модулятор (Modulator)***

Эта модель позволяет смоделировать несколько типов модуляторов, включая модулятор Маха-Цендера. При совместном использовании модели модулятора и модели лазера пользователь должен установить одинаковое значение числа точек на бит и разрядной ширины последовательности для моделей генератора двоичной последовательности и лазера с синхронизацией мод.

Параметры электрооптического модулятора, определяемые пользователем:

FittingType: тип электрического модулятора - fOffset;

ModulationType: тип функции реакция модуляции =MachZehender;

UPi Пиковое напряжение модулятора = 2В;

UBias падение напряжения на модуляторе = 1В;

UOffset напряжение смещения модулятора = 0В;

OnOffRatio вымирание или двухпозиционное отношение = 30дБ;

InsertionLoss вносимые потери = потери на волноводе + потери на соединении = 5 дБ;

Foffset смещение частотной характеристики = 16.655 ГГц;

Power показатель степени частотной характеристики = -0.10478;

Coef1 Coef1 в модуляторе = 1;

Coef2 Coef2 в модуляторе = 0.0114841/ГГц;

ChirpFactor параметр "чириканья" для модулятора Маха-Цендера.=0.5;

***Оптический мультиплексор (MUX)***

Параметры мультиплексора, задаваемые пользователем:

FilterType Тип фильтра на входе: поддерживающий отдельные типы фильтра - trapezoidal;

FilterSpecMod: Находятся ли спецификации фильтра в частоте или единицах длины волны - частота

FirstFilterCenter центральная частота (длина волны) фильтра =F1 Гц ( м);

FilterSpacing Зазор между фильтром = DF Гц или м;

FilterBW 3дБ ширина диапазона фильтра в длине волны = BW Гц или м;

FilterBW0dB Установить на 0дБ ширину диапазона для трапеци-идального типа фильтра = 9e9 Гц или м;

FilterFSR Освободить спектральный диапазон от оптического фильтра Фабри-Перо =100\*1010 дБ или м;

Потери Оптические вносимые потери фильтра =6 дБ.

***Оптическое волокно (Fiber)***

Эта модель вычисляет реакцию сигнала на волокно. При этом принимается во внимание затухание, дисперсия и нелинейность волокна. При использовании одноканального способа мультиплексирования волоконной модели, также принимается во внимание четырехволновое смешивание. При многоканальном способе четырехволновое смешивание не моделируется между отдельными каналами.

Распространение различных WDM-канальных сигналов моделируется следующим уравненем:

(2.1)



Здесь Ai - модуль комплексной амплитуды сигнала i-го канала, gi - групповая скорость, 2i - коэффициент дисперсии второго порядка, 3i - коэффициент дисперсии третьего порядка, i - коэффициент поглощения, gRji - коэффициент усиления Рамана в i-м канале, вызванного j-м каналом, i - параметр нелинейности волокна (i=2n2/iAeff), где n2 - коэффициент нелинейности, а Aeff - эффективное поперечное сечение волокна.

Коэффициенты усиления Рамана gRji интерполируются из экспериментальной кривой усиления Рамана кремниевого волокна. Состояния поляризации рассматриваются в равной степени распределенными среди параллельных и перпендикулярных состояний. Коэффициент усиления Рамана отрицательный, если i-й канал имеет более короткую длину волны, чем j-й канал.

Выражение для gRji имеет вид:

, (2.2)



где gRn(λj,λi) - интерполируемое усиление Рамана, λ0 = 1.0 мкм - длина волны для нормирования кривой усиления Рамана, поскольку расчетные коэффициенты усиления имеют единицу м-1Вт-1, gRmax=0.98⋅10-13 м/Вт - пиковое усиление Рамана.

Параметры волокна, определяемые пользователем.

Расстояние Длина волокна = 110\*103 м;

Диаметр Диаметр сердцевины = 8 \*10-6 м;

Потери Затухание на единицу длины = 0.25 дБ/км;

Beta2 дисперсия групповой скорости = -0.25\*10-27 с^2/м;

Beta3 дисперсия групповой скорости = 0.1\*10-39 с^2/м;

N1 групповой коэффициент = 1.4682

N2 Коэффициент нелинейности = 3.0\*10-20 м^2/Вт.

***EDFA усилитель***

Это модель блока оптического усилителя, в частности волоконного усилителя с добавками эрбия.

В этой модели EDFA усилителя усиление не зависит от длины волны. Причиной этого частично является зависимость коэффициента усиления от уровня насыщения усилителя, что усложняет моделирование. Коэффициент усиления является значительным фактором при моделировании многоволновых систем со спектральным разделением (WDM). В эту модель включено насыщение усиления при высоких входных мощностях и указанном усилении мощности:

, (2.3)



где G0 - малое усиление мощности сигнала, Psat - выходная мощность насыщения, Pave - общая средняя мощность в волокне.

Усиление G получают как сигнал так и предварительно сгенерированный самопроизвольный шум.

Параметры оптического усилителя EDFA, определяемые пользователем.

Усиление Оптический усилитель (усиление по амплитуде сигнала) = 26дБ;

Psat Оптическая мощность насыщения усилителя = 18 дБм;

BW Оптический усилитель ASE шумовая ширина диапазона =30\*10-9м.

Оптический демультиплексор (DEMUX)

Параметры DEMUX, задаваемые пользователем:

FilterType Тип фильтра на входе: поддерживающий отдельные типы фильтра - trapezoidal;

FilterSpecMod: Находятся ли спецификации фильтра в частоте или единицах длины волны - частота

FirstFilterCenter центральная частота (длина волны) фильтра =F1 Гц ( м);

FilterSpacing Зазор между фильтром = DF Гц или м;

FilterBW 3дБ ширина диапазона фильтра в длине волны = BW Гц или м;

FilterBW0dB Установить на 0дБ ширину диапазона для трапеци

идального типа фильтра = 0.8\*BW Гц или м;

FilterFSR Освободить спектральный диапазон от оптического фильтра Фабри-Перо =100\*1010 дБ или м;

Потери Оптические вносимые потери фильтра =6 дБ.

***Приемник***

Это модель оптического приемника и всех его стандартных составляющих. Данная модель преобразует входной оптический сигнал в электрический сигнал, который затем усиливает и фильтрует, а также вычисляет шум в сигнале. Рассмотрим различные части этой модели приемника.

Параметры приёмника, определяемые пользователем:

Pd\_deviceCapacitance Емкость элемента = 50\*10-15 Ф;

Pd\_layerThickness Толщина Активной Области = 0.5\*10-6 м;

Pd\_absorptionCoeff Коэффициент поглощения = 0.68\*106 1/м;

Pd\_reflectivity Отражающая способность в фотодиоде = 0.04;

Pd\_quantumEff Квантовая эффективность (КПД) = 0.8

Pd\_lossGain Усиление или потери реакции фотодетектора = 0 дБ;

Pd\_darkCurrent Темновой ток = 1\*10-6 A

Flt\_bandwidth Фильтр 3dB ширины диапазона = 10\*109 Гц;

Flt\_lossGain Усиление фильтра или потери = -3 дБ

***Тестер передачи ошибочных битов***

Эта модель вычисляет вероятность передачи ошибочных битов (BER) для входного электрический сигнала. Метод вычисления заключается в синхронизации входного электрического сигнала с соответствующим ему первоначальным двоичным сигналом, генерации данных глаза и получении вероятности передачи ошибочных битов. При этом блок BER имеет минимум два входа, на один из которых подаётся электрический сигнал от приемника, а на другой - соответствующий ему двоичный сигнал. Полученные данные могут буть сохранены в файле.

Чтобы улучшить точность вычислений BER, первый бит и последние три бита каждого входного сигнала игнорируются. Это делается для того, чтобы исключить определенные нефизические погрешности, которые могут присутствовать в этих разрядных периодах и которые привели бы к неправильным оценкам BER.

Параметры BER тестора определяемое пользователем:

TimingJitter Выбор времени принятия решения = 0 с;

DecisionLevelJitter Дрожание уровня принятия решений = 0В;

DecisionLevel Пороговое значение решения = 0В;

**5.2 Результаты моделирования**

В данном разделе представлены результаты моделирования нашей ВОЛС содержащей DWDM мультиплексор и EDFA усилитель.

На выходе источника излучения (CW лазера) мощность сигнала составляет 1мВт (0дбм). На выходе модулятора мощность сигнала составляет 3\*10-4Вт, что соответствует ослаблению сигнала на 5дб. На выходе из модуляторов сигналы подаются на оптический мультиплексор, который «сшивает» их в единый сигнал (рис 5.2 глаз-диаграмма (а) и спектрограмма (б)). На спектрограмме видно, что разнос частот между каналами составляет 100 ГГц, каналы расположены в соответствии со стандартным канальным планом.

На выходе мультиплексора мощность сигнала составляет

8\*10-5 Вт, т.е. мощность сигнала после мультиплексора уменьшилась на 6 дбм, таким образом модулятор с мультиплексором вносят ощутимые помехи, порядка 11 дбм.

Чтобы компенсировать потерянную мощность сигнала, перед вводом в волокно сигнал усиливаем с помощью усилителя мощности, выполненного на основе EDFA (Erbium - Dopped Fiber Amplifier)

Как видно усилитель мощности усиливает сигнал до уровня 2,5 мВт (~4дбм), что соответствует коэффициенту усиления 16 дБ. По расчетным данным дисперсионная длина волокна LEAFТМ на скорости 2.5 Гбит/с с DWDM уплотнением равна ~1750 км (L = 10500пс\*нм / 6 пс\*нм/км), т.е. дисперсия не является ограничением для ВОЛС в 550 км. Но для прохождения этой дистанции сигналу не хватает мощности. При увеличении мощности излучения лазера или увеличении коэффициента усиления EDFA в оптическом волокне начинают проявляться нелинейные эффекты, не желательные в нашем случае из-за ухудшения сигнала. Проблему потери мощности импульсов можно решить, используя тот же самый оптический усилитель EDFA в качестве линейного усилителя.

Оптический усилитель EDFA является 1R-регенератором, т.е. он восстанавливает только одну характеристику – мощность. Но в то же время он усиливает и шум, поэтому после EDFA отношение сигнал-шум уменьшается. При каскадном включении EDFA шумы накапливаются (5.4,б, г), что может привести к увеличению BER.

а) на выходе после волокна (110 км),

б) после усиления на первом линейном усилителе,

в) на выходе после волокна (220 км),

г) после усиления на втором линейном усилителе,

Мощность сигнала на выходе волокна (110 км) составляет 4.4\*10-6Вт

(-23.5 дбм). После усиления на первом линейном усилителе мощность сигнала составляет 1.6\*10-3Вт (~2дбм). Мощность сигнала на выходе волокна (220 км) составляет 2.8\*10-6Вт (-25.5 дбм). После усиления на втором линейном усилителе мощность сигнала составляет 11\*10-4Вт (~0,4дбм).

д) на выходе после волокна (330 км)

е) после усиления на третьем линейном усилителе

ж) на выходе после волокна (440 км)

и) после усиления на четвертом линейном усилителе

Мощность сигнала на выходе волокна (330 км) составляет 1.9\*10-6Вт

(-27.5 дбм). После усиления на третьем линейном усилителе мощность сигнала составляет 7.5\*10-4Вт (~-1.3дбм). Мощность сигнала на выходе волокна (440 км) составляет 1.3\*10-6Вт (-28.8 дбм). После усиления на четвервом линейном усилителе мощность сигнала составляет 5\*10-4Вт (~-3дбм).

Произведем оценку отношения сигнал/шум (S/N).

На выходе УМ мощность сигнала составляет – 5дбм. УМ и ПУ низкочувствительны к шумам, мощность шума на выходе УМ составляет

~-30дбм. Отсюда находим отношение сигнал/шум составляет ~ S/N = 5 - (-30) = 35дбм. ЛУ чувствителен к уровню шума и после каждого усиления отношение сигнал/шум уменьшается на 4дбм. После четвертого ЛУ отношение сигнал шум составляет S/N = 35 -16 = 19 дбм. Основная функция ПУ обеспечить требуемую мощность, и требуемое отношение сигнал/шум на входе приемника. Для стандарта STM-16 минимальное отношение сигнал/шум составляет - 18-21дб. Таким образом для ПУ достаточно оставить отношение сигнал/шум на прежнем уровне, обеспечив при этом требуемый уровень мощности сигнала на входе в приемник.

На рисунке 5.5 представлены спектр-диаграммы сигнала после прохождения 330 км и 550 км соответственно. Разнос между каналами составляет 100 ГГц что соответствует стандартному канальному плану. Из спектр-диаграммы видно, что спектр сигнала значительно сузился и по мере прохождения секции и потеря мощности сигнала составила порядка 27 дбм.

В нашем случае длина оптического волокна между линейными оптическими усилителями была выбрана равной 110 км. Это означает, что на всей длине регенерационного участка достаточно установить 1 усилитель мощности, 4 линейных усилителя и 1 предусилитель, что соответствует длине регенерационного участка 550 км. Это значение не превышает теоретическое значение длины регенерационного участка (~1700 км). На этом расстоянии BER = 2\*10-14. Заданием данной работы было обеспечить BER=10-13 на расстоянии 550 км.

Рассмотрим сигналы, поступающие на вход 3R-регенераторов, а также на приемник.

Мощность сигнала на выходе оптического волокна (рис 5.7,а) составляет 9\*10-7Вт (-30.4 дбм). Затем сигнал подается в предусилитель где усиливается на 30 дБ и подается на демультиплексор. В блоке демультиплексора единый световой поток разделяется на составляющие, т.е. на каждом выходе DEMUX выделяется своя длина волны. DEMUX тоже вносит свой вклад в ослабление сигнала порядка 6дб.(рис 5.7.б).

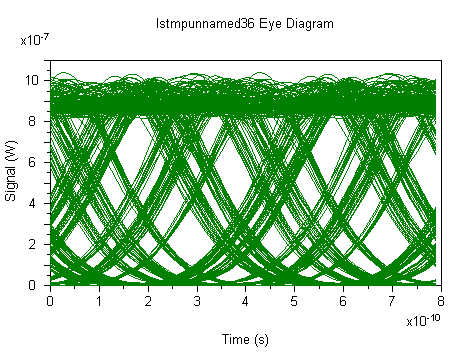
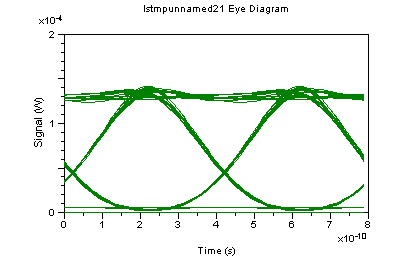
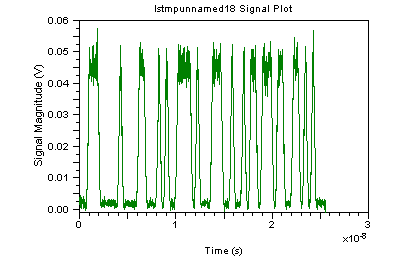


Рисунок 5.7 Глаз-диаграмма сигналов: а) на выходе волокна (550 км); б) на выходе демультиплексора (один из каналов).

После демультиплексирования (перед вводом излучения в приемник) мощность сигнала составляет 1.3\*10-4Вт (-8.8 дбм) (рис 5.7). Чувствительность приемного оборудования для интерфейса STM16 составляет ~ -10 – -20дбм.Таким образом мы обеспечили необходимую для правильного детектирования мощность сигнала. Мощность детектированного сигнала составляет ~5\*10-2Вт ~50мВт.

Произведем сравнение формы сигналов до входа в MUX и после выхода из DEMUX (рис 5.8). Полученный сигнал практически идентичен переданному сигналу, кроме, конечно, уровня мощности. Также заметны шумы, накопившиеся во время передачи по оптическому каналу, которые, в принципе не мешают нам детектировать принятый сигнал.

а)



б)



Рисунок 5.8 Осциллограммы сигналов: а) до входа в мультиплексор; б) после выхода из демультиплексора.

Детектирование принятого сигнала происходит в приемнике, который сам тоже является источником шума (рис 5.9).

Из рис 5.9 видно, что уровень вносимых потерь со стороны приемника ощутимый. Поэтому для уверенного детектирования нужен запас по фазе и амплитуде. Запас по фазе составляет 4\*10-10, запас по амплитуде составляет 4.5\*10-2Вт.

Как видим, для протяженной (магистральной) ВОЛС, налагаются жесткие требования как к интерфейсному оборудованию так и волокну. Для проектируемой ВОЛС основным ограничением является мощность. Исследуем зависимость коэффициента ошибок (BER) от затухания в оптическом волокне BERf (loss); от коэффициента усиления в линейном усилителе BERf (Gain); от скорости передачи BERf (bitrate).

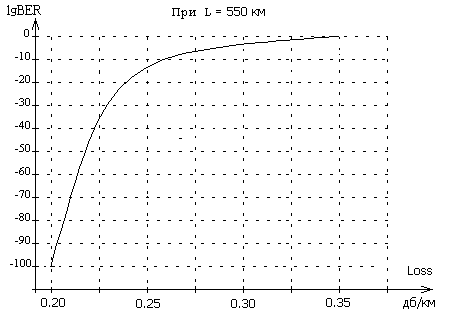


Рисунок 5.10 График зависимости BERf (loss).

Как видим из рисунка 5.10 к оптическому волокну предьявляются жесткие требования по затуханию, так уже при б = 0,30 дб/км для магистральной ВОЛС(550км) и при скорости передачи 2,5Гбит/с, BER→ 0, что совершенно неприемлемо. Требованиям для данных типов систем отвечают NZDSF волокна, имеющие в третьем окне прозрачности затухание порядка 0,20- 0,25 дб/км. При проектировании ВОЛС я использовал одномодовое NZDSF волокно – LEAFТМ.

Как видно из рисунка 5.11 очень важно правильно подобрать коэффициент усиления линейного усилителя, поскольку при малом коэффициенте усиления неприемлемым становится значение BER, а при большом коэффициенте усиления, из-за возникновения нелинейных эффектов, уменьшается отношение сигнал/шум. При моделировании ВОЛС я использовал коэффициент усиления G = 26 дб.

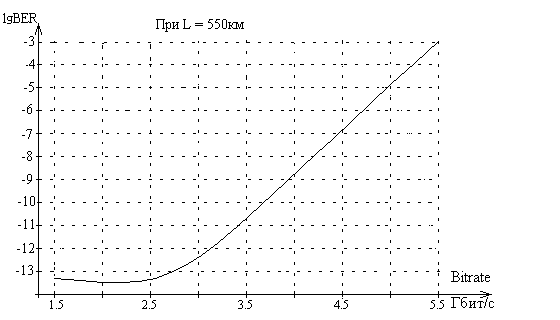


Рисунок 5.12 График зависимости BERf (Bitrate).

Из рисунка 5.12 видим, что при увеличении скорости передачи значение BER снижается. Это говорит о том , что для более высокоскоростных систем налагаются еще более жесткие требования к интерфейсному оборудованию. Число используемых линейных усилителей сокращается до 2-3, минимальное отношении сигнал/шум должно составлять не менее 29-31 дб.

Проведенное исследование показало возможность построении 8-ми канальной ВОЛС с волновым мультиплексированием и демультиплексированием на длине оптической линии 550 км и скорости передачи 2.5Гбит/с без оптоэлекронного преобразования сигнала. Уровень мощности сигнала в моделируемой линии составил - -8.8дбм, отношение сигнал сигнал/шум -19дб, что приемлемо для проектируемой ВОЛС.

6. Подбор промышленного оборудования для проектируемой ВОЛС

6.1 Характеристики промышленных мультиплексоров WDM

- Тип системы - дуплексные, или двунаправленные, (D), используют две оптические несущие на канал, и полудуплексные, или однонаправленные, (S), используют одну оптическую несущую на канал.

- Код - как правило широко используются два типа линейного кодирования: NRZ и RZ. Первый позволяет реализовать большую плотность эквивалентных бит на секундный интервал и более предпочтителен в системах SDH верхних уровней иерархии. Второй - широко используется в системах DWDM в силу специфики работы модуляторов. Интересно отметить, что система WL4 компании Siemens использует мультиплексор SDH типа SMA256, работающий на скорости 40 Гбит/с и реализованный на электронных компонентах (используется электронная система мультиплексирования ETDM, а не оптическая - OTDM), что позволяет добиться высокой общей емкости системы (160 Гбит/с) уже при 4-х каналах. Наличие такого мультиплексора позволяет надеятся, что в недалеком будущем может бвть реализована система WL32 общей емкостью потока через одно волокно 1,28 Тбит/с, если будут преодолены трудности с перекрытием оптических импульсов при таком сочетании высокой плотности каналов (разнос 100 ГГц) и высокой скорости потока в канале - 40 Гбит/с

- Число каналов ввода-вывода - реализовать оптический ввод/вывод трибов, участвующих в схеме первичного (электрического - ETDM или оптического OTDM) мультиплексирования SDH (опция drop/insert) в оптический канал (представленный отдельной оптической несущей) или из него в схеме вторичного оптического мультиплексирования WDM, достаточно сложно. Поэтому ряд систем WDM вообще не реализует эту опцию, обеспечивая лишь работу в режиме точка-точка (т-т), либо ограничивает число каналов, не которых эта опция может быть реализована (например, 4 из 16, 8 из 40, 12 из 64).

- Топология - в порядке сложности в системах WDM могут быть реализованы топологии: точка-точка (т-т) без возможности оптического ввода/вывода трибов SDH; последовательная линейная цепь (л) с возможностью ввода/вывода трибов SDH; звезда (з) или точка-много точек (т-мт), реализуемые с помощью концентратора; кольцо, которое может быть представлено в трех видах:

одинарное кольцо без защиты (к), двойное кольцо с защитой (к2), счетверенное кольцо с полно-дуплексной защитой (к4); ячеистая сеть (я) с возможностью динамической маршрутизации.

- Пролет (span)- участок пути, перекрываемый в результате компенсации потерь от затухания сигнала за счет запаса по усилению (бюджета) или за счет усиления в ОУ. Пролеты (в соответствии с G.692) по длине могут быть длинными L - до 80 км (как правило не содержат ОУ), очень длинными V - 120 км (как правило содержат МУ или ПУ) и сверхдлинными U - 160 км, как правило содержат мощный усилитель МУ и предварительный усилитель ПУ. Секции ограничены терминальными мультиплексорами ТМ.

Секции - участок пути, перекрываемый одним или несколькими пролетами в соответствии с конфигурацией (числу пролетов системы), на границе которого распложены регенераторы (в соответствии со стандартом G.692 длина секции - до 640 км); регенераторы применяются для восстановления оригинальной формы сигнала после нескольких пролетов.

- Дистанция - максимальное расстояние, на которое могут быть переданы данные, определяется числом пролетов и/или секций и длиной, перекрываемой одним пролетом/секцией. Учитывая приведенные выше данные по длинам перекрытий и секций, дистанция может быть равна 640-1280 км. Секции могут стыковаться без использования регенераторов путем соединения ТМ (back-to-back); использование одного регенератора, например, в системе WL8 компании Siemens, позволяет удвоить общую дистанцию передачи сигнала.

- Скорость входных данных, тип поддерживаемого логического интерфейса - указаны границы диапазона скоростей, которые определяются, кроме прочего, фактом поддержки того или иного логического интерфейса (или формата данных), определяющего с сетями каких технологий может стыковаться указанная система. Например, если минимальная скорость равна 10 Мбит/с, а в типах интерфейсов указан интерфейс Е - значит система WDM может стыковаться с сетью обычного Ethernet, если используемая скорость равна 100 Мбит/с и указан интерфейс FE - значит допустима стыковка с сетью Fast Ethernet. Если интерфейс GE, то допустима стыковка с сетью Gigabit Ethernet на скорости 1 Гбит/с, и т.д., см. список типов поддерживаемых интерфейсов и скорость, поддерживаемую этими интерфейсами в примечаниях к табл. 11-5. Для технологии АТМ могут использоваться несколько скоростей передачи, например, если в интерфейсах указано АТМ-ОСЗ,12 - это значит, что система WDM стыкуется с сетями АТМ на двух скоростях технологии SONET ОС-3 (155,52 Мбит/с) и ОС-12 (622,08 Мбит/с).

- Допуск - указывает, какую максимальную накопленную на длине одной секции дисперсию система WDM способна преодолеть без потери качества сигнала, определяемого уровнем ошибок системы (показатель BER). Эта величина используется для проверки возможности системы (секции) перекрыть определенную дистанцию. С этой целью, зная конкретный тип волокна и соответствующее ему значение дисперсионного параметра D, определяемого для граничной длины волны в занимаемой полосе, проводится подсчет фактически накопленной дисперсии путем умножения значения D, размерность [пс/нм/км], на длину секции, выраженную в километрах (плюс допуск по затуханию для защиты от возможного ухудшения затухания от целого ряда параметров ВОЛС. Если фактический допуск меньше предельного - система работоспособна при использовании данного волокна, если нет - должно быть использовано другое волокно или уменьшена длина секции, или, если последнее нежелательно или невозможно, то следует использовать компенсаторы дисперсии, о которых мы уже упоминали выше (допуски на накопленную дисперсию приведены в стандарте G.692).

- Канал управления - имеется ввиду оптический канал супервизор юго управления ОКСУ, называемый в оригинальных документах каналом OSC (Optical Supervision Channel). Этот канал организуется для проверки ОУ (расположенных на промежуточных узлах) на дополнительной оптической несущей, которая лежит за пределами фактически используемой полосы (внеполосная OSC), хотя может лежать и внутри полосы (внутриполосная OSC), занимаемой стандартным частотным планом, так и соответствовать некоторым стандартным (но неиспользуемым для основной полосы) несущим.

- Управление - имеется ввиду управление системой в целом, включая управление мультиплексорами SDH/SONET или оборудованием сети, с которой стыкуется аппаратура WDM. В этом смысле оно разбивается на традиционное для систем SDH/SONET полноценное управление на основе TMN с использованием интерфейсов Q и F, с одной стороны, и на супервизорное управление с использованием агента SNMP, популярного для локальных сетей, с другой. Или же используется специально разработанная система управления сетью WDM, включающая в последнее время специальную систему мониторинга ВОК.

* 1. **Подбор транспортной системы для проектируемой линии связи**

Рассмотрим блок-схему серийного 8-канального мультиплексора WL8 компании Siemens. Основные характеристики 8-канального мультиплексора WL8 компании Siemens:

1. Модель – WL8/16/32.
2. Число каналов данных – 8/16/32.
3. Код – NRZ.
4. Емкость волокна – 20-320 Гбит/с.
5. Топология – «точка - точка», «двойное кольцо с защитой».
6. Секция пролеты:

Максимальное число – 5.

Длина – 120-140 км.

1. Секция-дистанция – 1200 км.
2. Скорость на входе – 2,5-10 Гбит/с.
3. Разнос несущих – 100 ГГц.
4. Тип волокна – SF, NZDSF.
5. Канал управления 1480/2 нм/МГц.
6. Тип поддерживаемых логических интерфейсов – ОС-48,192;STM-16,64.
7. Управление TMN – Q3.

Этот мультиплексор позволяет объединить 8 оптических несущих, разнесенных на 100 ГГц друг от друга и расположенных в соответствии со стандартным канальным планом. В качестве служебного супервизорного канала OSC используется 9-й канал на частоте 202,6 ТГц (1480,0 нм).

Каждая оптическая несущая может модулироваться в настоящее время входным сигналом с выхода мультиплексора SDH SL16 уровня STM-16 (2,5 ГГц) компании Siemens, а в перспективе может использовать выходной сигнал мультиплексора SL64 уровня STM-64 (10 ГГц), что позволит довести канальную емкость одного волокна с 20 до 80 Гбит/с, перекрывая одной секцией расстояние до 120 км без регенератора.

Система мультиплексирования WDM комплектуется тремя модулями: оптическим терминальным модулем ОТМ (WLT), оптическим усилительным модулем ОУМ (WLP) и оптическим регенераторным модулем ОРМ (WLR). Общая схема их взаимодействия такова: сигналы 8 синхронных линейных терминальных мультиплексоров SLT-nn мультиплексируются и усиливаются модулем WLT, дополнительно усиливаются модулем WLP (если есть необходимость, например, перекрыть одной секцией расстояние до 120 км) и подаются в ВОК (модули WLT и WLP формируют секцию). Затем сигналы принимаются следующей секцией или (если нужно, например, обеспечить передачу на расстояние большее 600 км) регенерируются модулем WLR и передаются на следующую секцию и так до последней - приемной секции, где происходит их демодуляция.

Итак, указанные модули позволяют реализовать топологию "точка-точка" в следующих трех вариантах, когда используются один, два или три модуля в связке с кабелем ВОК:

1 - WLT -ВОК - WLT - ВОК ... ВОК - WLT;

2 - WLT - WLP - ВОК - WLP - WLT - ВОК ... ВОК - WLP - WLT;

3 - WLT - WLP - BOK - WLP - WLT - BOK ... BOK - WLR - WLP - WLT - BOK ... BOK - WLP -WLT.

В режиме передачи модуль WLT мультиплексирует в блоке WDM-MX 8 потоков (каналов) SDH (от 8 терминальных мультиплексоров SLT) уровня STM-16 (и до STM-64), формируя агрегатный поток 20 (80) Гбит/с, который усиливается бустером 0В, после чего к нему с помощью комбайнера (простого мультиплексора WDM на 2 входа) добавляется несущая служебного супер-визорного канала OSC As. Общий поток затем либо подается в ВОК (вариант 1), либо усиливается модулем WLP (вариант 2). В последнем случае из входного потока выделяется несущая канала OSC анализируемая контроллером SPC, которая затем с помощью комбайнера снова объединяется с усиленным основным потоком. Основной поток (8 несущих) усиливается предварительным усилителем ОР (первый каскад двухкаскадного усилителя в модуле WLP) и затем передается или в бустер 0В (при замкнутой перемычке в модуле OAU-M) или, используя возможность межкаскадного доступа через интерфейс доступа II, .подается на вставляемый межкаскадный блок, например, в компенсирующее дисперсию волокно (при необходимости коррекции общей дисперсии), а затем в бустер 0В и далее в ВОК. В варианте 2 поток из ВОК подается на вход модуля WLP приемной стороны, а в варианте 3 - на вход регенераторного модуля WLR.

В режиме приема модуль WLT либо принимает поток из ВОК (вариант 1), либо от WLP (вариант 2), в котором обработка осуществляется в той же последовтельности, что и описана выше, но по другому каналу (блок OAU-S) с использованием того же SPC. Принятый WLT поток, после предварительного усиления в блоке ОР, демультиплексируется блоком WDM-DX на n выходных потоков, подаваемых на входные интерфейсы терминальных мультиплексоров SLT.

Схема модуля регенератора WLR похожа на схему WLT, но симметрична - имеет два комплекта блоков ОР/ОВ (т.е. как OAU-M, так и OAU-S) и два комплекта блоков WDM-MX/WDM-DX. Последние замкнуты на стандартный SDH-регенератор SLR (уровня STM-16 или STM-64), который собственно и осуществляет регенерацию по классической схеме: 0/Е-преобразование сигнала на входе электронная регенерация и обратное Е/0-преобразование сигнала на выходе.

Общее управление осуществляется во всех трех модулях контроллером SPC блока OAU-М, на вход которого подаются сигналы управления и аварийной сигнализации различного типа:

внешнее управление AUX и внутреннее служебное управление EOW, подаваемое через блок доступа к заголовку ОНА; управление от NMS типа TMN через интерфейс Q и сигналы аварийной сигнализации C-AL, подаваемые через блок TIF.

# 

# **Подбор оптического кабеля**

Оптическое волокно, используемое в оптических кабелях связи, состоит из сердечника, образованного легированным кварцевым стеклом, окруженного отражающей оболочкой из чистого кварцевого стекла. Слои акрилата защищают волокно и предохраняют от проникновения влаги и агрессивных химических соединений. Чистота и различные оптические свойства отражающей оболочки сердечника позволяют направлять свет по волокну на расстояние превышающее 300 км без усиления.

Для моего дипломного проекта я выбрал волокно фирмы "CORNING Inc.", США, являющейся мировым лидером в этой области. Для того чтобы организовать качественную передачу информации со скоростью 2.5 Гбит/с на расстояние 550 км без регенерации, необходимо использовать одномодовое волокно Корнинг LAEFТМ (рекомендация МСЭ-Т G.655).

# Оптический кабель: эксплуатационные характеристики

Самарская оптическая кабельная компания (СОКК) использует в производстве кабелей связи волокно фирмы "CORNING Inc.", США, поэтому для своего проекта я выбрал кабель – ОКЛЖ компании СОКК.

Самарская оптическая кабельная компания производит оптический самонесущий, диэлектрический кабель типа ОКЛЖ, который применяется для подвески на опорах контактной сети электрофицированных железных дорог и линий электропередачи, воздушных линий передачи и городского энергохозяйства.

Особенности:

- полностью диэлектрический кабель;

- способность выдерживать высокие механические нагрузки;

- повив (слой) силовых элементов в виде высокопрочных синтетических нитей, обеспечивающих гибкость и небольшой наружный диаметр кабеля; стойкость к воздействию электрического поля (трекингостойкость);

- минимальный вес;

- диапазон рабочей температуры: -60°..+70°;

- длительный срок службы;

- возможность изготовления больших строительных длин;

- создает минимальные дополнительные нагрузки на опоры.

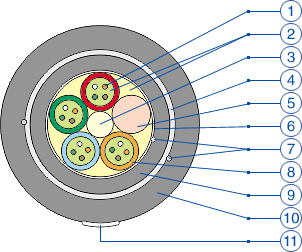


Рис.6 Поперечный разрез кабеля типа ОКЛЖ.

1. оптическое волокно фирмы "Корнинг"

2. гидрофобный заполнитель

3. центральный силовой элемент (стеклопластик)

4. силовые элементы (арамидные нити)

5. кордель

6. скрепляющая лента

7. вспарывающий корд (по требованию)

8. полимерная трубка

9. полимерная защитная внутренняя оболочка

10. полимерная защитная наружная оболочка

11. маркировка

Эксплуатационные характеристики кабеля типа ОКЛЖ.

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Количество ОВ | 2-96 |
| Номинальный наружний диаметр, мм | 12.0-22.0 |
| Расчетный вес, кг/м | 120-410 |
| \*Коэффициент затухания, дБ/км, не более:  - на длине волны 1.31 мкм   * на длине волны 1.55 мкм | 0.34  0.20 |
| \*Хроматическая дисперсия, пс/нм·км, не более:  - на длине волны 1.31 мкм  - на длине волны 1.55 мкм | 2  6 |
| Разрывное усилие, кН, не менее | 10.0 - 100.0 |
| Максимально допустимое растягивающее усилие, кН | 3.5 - 30.0 |

Параметры кабеля в каждом отдельном случае рассчитываются в соответствии с техническими требованиями заказчика, в зависимости от значений пролетов, провесов и условий эксплуатации. Возможно изготовление кабеля с 6 оптическими одномодовыми волокнами производства фирмы КОРНИНГ - марки LAEFТМ (6 волокон на мультиплексор: 2 основных, 2 для горячего резерва, 2 свободных).

# **7. Основные положения технологии подвески волоконно-оптического кабеля (ВОК).**

В последнее время наиболее популярным методом строительства ВОЛС становится вариант подвески ВОК на опорах ЛЭП энергетиков, опорах контактной сети и ЛЭП автоблокировки железнодорожного транспорта, а также на опорах осветительной сети и наземного электрического транспорта.

В своем дипломном проекте я выбрал тип прокладки – подвесной, выбор сделан благодаря приемуществам указанным ниже. Проектируемая линия Уфа – Казань будет осуществлена вдоль автомагистрали на опорах ЛЭП (длина магистрали составляет 525 км). Таким образом при моделировании ВОЛС я имел запас в 25 км.

Подвеска ВОК осуществляется на уже установленных опорах и не требует тщательной предварительной подготовки трассы прокладки, поэтому более технологична и проста, чем прокладка в грунт. Опыт строительства ВОЛС МПС РФ показывает, что стоимость строительства с использованием подвески ВОК обходится на 30-35% дешевле, чем при строительстве с прокладкой ВОК в грунт, при этом сроки строительства сокращаются в 2,5-3 раза. Особенность применения ВОК для подвески на опорах заключается в способности кабеля к упругому продольному растяжению до 1,5% без возникновения нагрузок на оптическом волокне.

Для строительства ВОЛС методом подвески кабеля на опорах железнодорожного транспорта используется только диэлектрический самонесущий ВОК. Во время эксплуатации данный кабель испытывает значительные колебания температуры, скорости ветра и осадков, вибраций, что предъявляет определенные требования к технологии подвески. Одним из главных является принцип ограничения механических воздействий на оболочку, на растяжение ВОК, сдавливающие нагрузки, а также углы поворота трассы ВОК. Технология подвески ВОК должна обеспечить сохранность покрытия оболочки кабеля при протяжке от повреждений.

Современная технология подвески ВОК предусматривает два этапа:

- подготовительный этап, включающий в себя обшестроительные работы, замену дефектных и поврежденных опор, установку дополнительных опор, заказ и приобретение специальных кронштейнов крепления ВОК в соответствии с типами, указанными в проекте, кронштейнов для крепления запасов кабеля и оптических муфт, узлов анкеровки.

- на втором этапе, связанном непосредственно с подвеской ВОК, осуществляются: крепление кронштейнов на опорах; крепление на кронштейнах технологических роликов для протяжки трос-лидера, а затем с помощью его и кабеля; замена роликов на специальные натяжные или поддерживающие зажимы и крепление кабеля; монтаж муфт; устройство анкеровок и крепление запасов ВОК; подключение кабеля к кроссовому оборудованию; измерение и паспортизация пассивной части ВОЛС. Все работы по подвеске ВОК на опорах выполняются в соответствии с действующими правилами и нормами, а также техническими условиями, заложенными в проектах.

При строительстве ВОЛС методом подвески на опорах высоковольтных линий связи также применяют:

- оптический кабель малого диаметра, который с помощью специальных механизмов наматывается с определенным шагом намотки на фазный провод или грозозащитный трос;

- встроенный в грозотрос специальный оптический кабель (как правило, используется только при реконструкции высоковольтной линии с заменой грозотроса);

- подвеска оптических кабелей к стальному канату (тросу), натянутому между столбовыми опорами на консолях;

- подвеска кабеля с встроенным тросом на консолях специальной конструкции.

В любом из этих способов подвески ВОК должны обеспечиваться заданные оптические параметры в течение всего срока службы (на менее 25 лет).

**Экономика**

Современные транспортные системы для увеличения пропускной способности оптических линий используют многоканальные мультиплексоры. Мультиплексоры помогают сэкономить значительные средства, обеспечивая передачу информации на различных длинах волн по одной линии и делая тем самым ненужным прокладку новых оптоволоконнных линий.

Стоимость волоконно-оптической сети сегодня составляет десятки и сотни миллионов рублей, и при ее создании требует решать более 50 разноплановых технических и организационных задач, которые должны быть координированы во времени и иметь гарантированное материально-техническое обеспечение. Поэтому успех выполнения проекта сети зависит, прежде всего, от организации работ. Нарушение организационной структуры выполнения проекта резко снижает качество работы.

Типовая структура цены волоконно-оптической линий связи, которую сегодня часто строят вдоль автомагистрали или полотна железной дороги, имеет следующее распределение средств ( в процентах):

- управление проектом ~ 1-3 %

* проектирование ~ 1-3 %
* оборудование, включая системную интеграцию в единую сетевую структуру + стоимость оптического кабеля ~ 75 %
* строительство ВОЛС ~ 6 - 10 %
* создание центра управления и службы эксплуатации ~ 8 - 10 %
* обучение ~ 1- 2 %
* непредвиденные (прочие) расходы ~ 2 - 4 %

В общем случае, дополнительно нужно учитывать расходы на таможенные пошлины ~ 5-20 %, оплату налогов ~ до 20% от стоимости оборудования и расходы на эксплуатацию сети, которые в первый год могу составлять до 10 %.

Подчитаем стоимость проектируемой линии.

Длина волоконно-оптической линии равна 550 км, скорость передачи информации 2.5Гбит/с (STM-16).

Оборудование – 8-ми канальная транспортная система WL8 – компании Сименс.

Оптический кабель – ОКЛЖ – самарской компании, использующее различные типы волокон компании Корнинг.

Так как в дипломном проекте была показана возможность проектировать линию связи при использовании как стандартного одномодового волокна, так и при использовании одномодового NZDSF волокна, то и стоимость проекта подчитаем для двух типов волокон.

Стоимость оптического кабеля:

1. при использовании стандартного одномодового волокна SMF28 фирмы Корнинг 1 км оптического кабеля будет стоить – 90 000 рублей. Вся линия в 550 км будет стоить 90 000\*550 = 49 500 000 руб. Один модуль МКД (волокна компенсирующего дисперсию) будет стоить – 200 000 рублей, потребуется 4 модуля, т.е. – 800 000 рублей. Используем модуль фирмы Корнинг DCM-95.
2. при использовании одномодового NZDSF волокна LEAFтм фирмы Корнинг 1 км оптического кабеля будет стоить – 120 000 рублей. Вся линия в 550 км будет стоить 120 000\*550 = 66 000 000 руб.

Оборудование – транспортная система WL8 компании Сименс будет стоить ~ 9 000 000 руб.

Общая стоимость оборудование + оптический кабель будет составлять в:

1-ом случае - 59 300 000 руб.,

2-ом – 75 000 000 руб.

Как было сказано выше стоимость оборудования ВОЛС составляет примерно 75 % от всех затрат строительства проекта.

Отсюда,

1. 59 300 000 - 75 %

Себестоимость - 100 %

# Себестоимость = (59 300 000 \* 100)/ 75 = 79 000 000 руб.

1. 75 000 000 - 75 %

## Себестоимость - 100 %

Себестоимость = (75 000 000 \* 100)/ 75 = 100 000 000 руб.

Подчитаем срок окупаемости проектируемой линии:

Цена одного канала STM-16 за час равен – 600 руб. Подчитаем за сутки: 600 \* 24 = 14 400 руб. Так как линия 8-ми канальная: то за сутки – 115 200 руб.

Подчитаем сумму за год: 155 200 \* 365 ≈ 42 000 000 руб.

Учтем, что система постоянно не загружена на 100 %. Подчитаем сумму при загруженности системы на 80 %, отсюда

42 000 000 - 100 %

За год - 80 %

За год = (42 000 000 \* 80) / 100 ≈ 33 000 000 руб.

Из полученных результатов делаем вывод, что проектируемая мною линия в 1-ом случае окупит себя примерно за 2,5 года, во 2-ом случае примерно за 3 года.

Как было сказано выше нужно учитывать таможенные пошлины при ввозе оборудования, оплату налогов – до 20 % от стоимости всей системы, расходы на зарплату обслуживающему персоналу, расходы на экплуатацию сети, которые в первый год могут составлять до – 10 %.

С учетом выше перечисленного срок окупаемости увеличивается примерно в два раза т. е. будет составлять 5 и 6 лет соответственно в первом и втором случае.

Техника безопасности

В качестве техники безопасности при моделировании ВОЛСВ на ЭВМ, можно использовать эргономику рабочего места оператора ЭВМ.

Рабочее место оператора должно отвечать определенным требованиям, обеспечивать максимальную комфортабельность условий работы за компьютером, способствовать сохранению работоспособности и хорошего самочувствия в течение дня.

Рабочее место оператора ЭВМ включает:

* монитор

Монитор является основным звеном безопасности в настольной вычислительной системе. Плохой монитор может стать вполне реальной угрозой здоровью человека. В тоже время монитор высокого качества благодаря высоким техническим данным и низкому уровню электромагнитных излучений повышает продуктивность работы, предотвращает зрительное утомление, усталость и головные боли.

Монитор должен отвечать требованиям по размеру видимой части экрана, разрешению, частоте смены кадров, мультичастотности, экранному покрытию и настройке экрана. Частота регенерации кадров не менее 75 Гц при оптимальном для каждого класса разрешении.

Монитор должен полностью удовлетворять стандартам MPRII, TCO и требованиям безопасности, установленным ГОСТ Р50948-96 « Средства отображения информации индивидуального пользования», по уровню переменных электромагнитных и электростатических полей.

* клавиатура и манипулятор «мышь»

Клавиатура является основным устройством ввода и от ее конструктивной особенности зависит, как бистро устанет оператор и, следовательно, производительность труда. Недостатком клавиатуры является быстрая утомляемость кисти руки при длительной работе, так как кисть находится все время в подвешенном состоянии, что создает нагрузку на мышцы предплечья.

Особое внимание специалистов в области эргономики привлекает – манипулятор типа «мышь».

Недостатком всех манипуляторов «мышь» является то что при каждом поднятии руки и повторяющемся ее удержании над каким-нибудь предметом предплечье испытывает значительную нагрузку. На рынке имеются подвижные опоры для кистей, перемещающиеся вместе с руками. Эти опоры размещаются так, чтобы кисти свободно с них свисали, что снижает нагрузку на предплечье и снижает утомляемость.

* рабочий стол и кресло

Рабочая мебель при работе с компьютером играет важную роль в создании оптимальных условий работы человека. Грамотное ее использование позволяет снизить степень утомляемости, повысить работоспособность, производительность труда, концентрацию внимания.

Компьютерная мебель должна быть удобной, прочной надежной, и иметь аккуратный вид. При этом конструкция и размеры стола и кресла должны способствовать оптимальной позе оператора, при которых выдерживаются определенные угловые соотношения между «шарнирными» частями тела. Правильная поза (следовательно, и правильное функционирование организма) поможет сохранению здоровья и воспрепятствует симптомов синдрома компьютерного стресса, а также симптома постоянных нагрузок.

Выводы

Только правильное соблюдение требований и мероприятий по оптимизации труда оператора ЭВМ позволяет сохранить не только нормальную работоспособность, но и самое главное – здоровье.

Ведь вся разработка мероприятий по оптимизации условий труда оператора ЭВМ предназначена для предотвращения неблагоприятного воздействия на человека вредных факторов, сопровождающих работы с видеодисплейными терминалами и персональными электронно-вычислительными машинами.

**Заключение**

В данном дипломном проекте была смоделирована 8-ми канальная DWDM линия длиной в 550 км, скорости передачи 2.5 Гбит/с, отношение сигнал/шум (S/N) составило 19 дб, вероятность появления ошибки (BER) составила 2\*10-14, что удовлетворяет международному стандарту.

Исследованы зависимости вероятности ошибки (BER): от коэффициента затухания в волокне (Loss), от коэффициента усиления (G), от скорости передачи информации (Bitrate). Получены и проанализированы осциллограммы и глаз-диаграммы линии связи в различных точках.

Проведены расчеты дисперсии и затухания, выбрана длина регенерационного участка Lрег = 110 км. Число линейных усилителей на линии равно 4.

Для проектируемой волоконно-оптической линии было подобрано следующее оборудование:

- транспортная DWDM система - WL8, компании Сименс;

- оптическое волокно – LEAFТМ, фирмы Корнинг;

- оптический кабель – ОКЛЖ, компании СОКК г. Самара.

Рассмотрены основные аспекты по охране труда и технике безопасности инженера-проектировщика (оператора ЭВМ).

Были проведены экономические расчеты окупаемости проектируемой волоконно-оптической линии связи, которое составило 5 – 6 лет.

**Список литературы**

1. Иванов А.Б. Волоконнаяоптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: КомпанияСайрус систем, 1999
2. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: Компьютер Пресс, 1998. – 302с. - ил.
3. Вербовецкий А.А. Основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи. – М.: Радио и связь, - 2000. – 160с. – ил.
4. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно – оптические сети. М.: ЭКО – ТРЕНДЗ, 1998. – 267с.
5. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно – оптическая техника: достижения, преспективы. М.: Издательство Connect, 2000.
6. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи: Учеб. пособие для вузов, под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – М.:Радио и связь. – 1996. – 344с.
7. Дональд Дж . СтерлингТехническое руководство по волоконной оптике. – М.:Лори, 1993. – 288с.