**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**УЧИЛИЩЕ СВЯЗИ**

**КАФЕДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**ПО ТЕМЕ:**

**«Цифровая волоконно – оптическая система передачи со скоростью 422 Мбит / с для кабельного телевидения»**

**Выполнил:**

**Проверил:**

**Ростов-на-Дону, 2006**

ОГЛАВЛЕНИЕ:

[Введение 3](#_Toc150699218)

[ГЛАВА I 5](#_Toc150699219)

[1. 1. Цифровые волоконно-оптические системы связи, понятие, структура 5](#_Toc150699220)

[ГЛАВА II 9](#_Toc150699221)

[2.1. Основные принципы цифровой системы передачи данных 9](#_Toc150699222)

[Метод временного мультиплексирования (ТDМ) 11](#_Toc150699223)

[Метод частотного уплотнения (FDM) 12](#_Toc150699224)

[Уплотнение по поляризации (PDM) 12](#_Toc150699225)

[Многоволновое мультиплексирование оптических несущих (WDM) 13](#_Toc150699226)

[2.2. Процессы, происходящие в оптическом волокне, и их влияние на скорость и дальность передачи информации 16](#_Toc150699227)

[Соединение оптических волокон 19](#_Toc150699228)

[Оптическое волокно. Общие положения 20](#_Toc150699229)

[Одномодовые оптические волокна 24](#_Toc150699230)

[Константа распространения и фазовая скорость 26](#_Toc150699231)

[Затухание оптического волокна 28](#_Toc150699232)

[Дисперсия 31](#_Toc150699233)

[Распространение световых импульсов в среде с дисперсией 34](#_Toc150699234)

[Природа поляризационных эффектов в одномодовом оптическом волокне 38](#_Toc150699235)

[Контроль PMD в процессе эксплуатации ВОСП. 42](#_Toc150699236)

[Заключение 43](#_Toc150699237)

[Список использованных источников информации 44](#_Toc150699238)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Список принятых сокращений 45](#_Toc150699239)

Введение

Наступивший XXI век может быть охарактеризован бурным развитием процессов информатизации во всех сферах человеческой жизни, объединяющим людей из разных стран, без географических и геополитических границ. Информация, роль которой в таком обществе, часто именуемым информационным (постиндустриальным) неумолимо возрастает, становится не только фактором общения, обладания новыми знаниями, но также и важнейшим средством производства. Современные телекоммуникационные технологии позволяют сделать доступным все, для всех, везде и всегда, позволяя организовать совместную работу большого количества людей на основе их прямых связей, давая почти полную свободу перемещать информацию. Оптическое волокно (далее - ОВ), широкомасштабное использование в волоконно-оптических линий связи (далее - ВОЛС) которого началась примерно 40 лет назад, в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Сегодня волоконная оптика находит применение практически во всех задачах, связанных с передачей информации. Стремительно входят в нашу жизнь волоконно-оптические интерфейсы в локальных и региональных сетях Ethernet, FDDI, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, ATM. Множество компаний, в том числе крупнейшие: IBM, Lucent Technologies, Nortel, Corning, Alcoa Fujikura, Siemens, Pirelli ведут интенсивные исследования в области волоконно-оптических технологий. К числу наиболее прогрессивных можно отнести технологию сверхплотного волнового мультиплексирования по длине волны DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), позволяющую значительно увеличить пропускную способность существующих волоконно-оптических магистралей.

Область возможных применений ВОЛС весьма широка — от городской и сельской связи до систем связи на большие расстояния с высокой информационной емкостью. На основе оптической волоконной связи могут быть созданы принципиально новые системы передачи информации. На базе ВОЛС развивается единая интегральная сеть многоцелевого назначения. Весьма перспективным является применение волоконно-оптических систем в кабельном телевидении, которое обеспечивает высокое качество изображения и существенно расширяет возможности информационного обслуживания абонентов, являющееся предметом настоящей курсовой работы. Итак, целью представленной работы является исследование применения цифровых волоконно – оптических систем передачи со скоростью 486 Мбит / с для передачи сигналов кабельного телевидения. В соответствии с этой целью поставлены следующие задачи:

- исследовать основные принципы цифровой системы передачи данных

- раскрыть понятие и структуру цифровой волоконно – оптической системы связи,

- исследовать процессы, происходящие в оптическом волокне, и их влияние на скорость и дальность передачи информации

В качестве источников информации были использованы учебные и научные материалы, в том числе Интернет – ресурсы. Структура представленной работы обусловлена логикой исследования и включает введение, основную часть, включающую две главы, заключение с выводами, список использованных источников, приложения.

ГЛАВА I

1. 1. Цифровые волоконно-оптические системы связи, понятие, структура

Цифровые волоконно-оптические системы связи (далее - ВОСС) предназначены для передачи цифровых сигналов, несущих информацию, от передающей информационной системы (ИС) к ИС приемника (абонента). Как передающая информацию ИС, так и принимающая информацию ИС работают с цифровыми электрическими сигналами. В то же время сам процесс передачи информационных сигналов осуществляется оптическими импульсами, распространяющимися вдоль волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)[[1]](#footnote-1).

Последовательность электрических сигналов (сообщение), формируемое передающей ИС, преобразуется оптическим передатчиком в последовательность оптических сигналов[[2]](#footnote-2), вводимых в оптическое волокно и распространяющихся в нем до приемной части. В приемной части ВОЛС оптические сигналы вновь преобразуются в электрические. Преобразование оптических сигналов в электрические происходит в приемниках оптического излучения.

Приемники оптического излучения цифровых волоконнооптических систем связи. Приемники оптического излучения (фотоприемники) в цифровых системах связи представляют собой сложные устройства, осуществляющие преобразование световых сигналов в электрические. Для этого световое излучение преобразуется в электрический ток, усиливается, а затем происходит восстановление переданного сообщения и формирование соответствующего этому сообщению электрического сигнала. Подавляющее большинство действующих оптических систем передачи информации используют двоичный (бинарный) код и простейшую амплитудную модуляцию с двумя значениями амплитуды сигнала. Приемники оптического излучения для таких систем и будут рассмотрены в данной статье, тем более что они имеют наиболее простую структуру. В последнее время в научных лабораториях интенсивно исследуются различные новые форматы модуляции, под которым понимается процесс   преобразования  первичного  сигнала  заключается  в изменений одного  или   нескольких   параметров  несущего  колебания  по  закону изменения   первичного   сигнала,   т.е.  в  наделении несущего колебания признаками   первичного  сигнала .  Обычно  в качестве   переносчиков   используют  гармоническое  колебание  высокой частоты  - несущее  колебание[[3]](#footnote-3). Приемники для таких систем имеют боле сложную структуру, но в них составной частью присутствуют приемники бинарных амплитудно-модулированных сигналов. Цифровой фотоприемник (приемник цифровой волоконно-оптической системы связи с амплитудной модуляцией и прямым детектированием) конструктивно состоит из четырех блоков. В первом блоке происходит последовательное преобразование оптических сигналов в электрический ток (оптоэлектронное преобразование). Во втором блоке осуществляется линейное усиление электрического тока, в третьем блоке происходит восстановление данных, а в четвертом – создание выходного электрического сигнала.

Преобразование модулированного светового излучения (светового сигнала) в модулированный электрический ток происходит в фотодиоде. Ток фотодиода (фототок)усиливается малошумящим трансимпедансным усилителем. Выходящие из него электрические импульсы тока усиливаются линейным усилителем с автоматической регулировкой усиления, фильтруются и попадают в блок восстановления данных. В блоке восстановления данных усиленный электрический импульс делится на три части. Одна часть импульса используется для формирования тактовой частоты в блоке синхронизации. Вторая часть электрического импульса используется для формирования постоянного порогового тока, используемого в качестве уровня сравнения с импульсами тока информационного сигнала. Третья часть сигнала подается на схему сравнения, где она сравнивается с пороговым значением тока для принятия решения о том, какой символ, 1 или 0, передан. Сравнивать значение импульса тока с пороговым значением необходимо в точно определенные моменты времени, соответствующие середине тактовых периодов. Интервалы времени, в которые происходит сравнение порогового значения тока с величиной тока фотодиода, задает генератор тактовой частоты. Для оптимальной работы фотоприемника величина среднего значения усиленного тока должна приблизительно совпадать с пороговым значением. Выполнение этого условия обеспечивает блок автоматической регулировки усиления. Схема сравнения управляет работой формирователя электрических сигналов, который в зависимости от результатов сравнения создает электрический сигнал, соответствующий логической единице или логическому нулю. Чувствительность приемников оптического излучения

Важнейшей рабочей характеристикой действующей системы передачи информации, определяющей качество связи, является коэффициент ошибок. Его значение равно отношению числа ошибочно интерпретированных символов к общему числу переданных символов. Причина возникновения ошибок – наличие шумов.

Для нормальной работы цифровой системы связи требуется, чтобы шум не превышал некоторого заданного значения. При фиксированной скорости передачи информации и пренебрежении шумами самого светового сигнала шумы фотоприемника можно считать постоянными и не зависящими от мощности света. Очевидно, что в этом случае Куменьшается при увеличении амплитуды полезного сигнала и увеличивается при его уменьшении. Минимальное значение средней мощности оптического излучения, необходимое для передачи сигналов с заданным коэффициентом ошибок, называется чувствительностью оптического приемника. В цифровых системах голосовой связи максимально допустимое значение коэффициента ошибок обычно принимается равным 10. Чувствительность может выражаться в линейных единицах, производных от ватта (нВт, мкВт) или в логарифмических – децибелах по отношению к милливатту (дБм). Реальная чувствительность приемников определяется многими факторами: нормируемым значением коэффициента ошибок, формой импульса, скоростью передачи информации, шириной полосы приемника и шумами оптического изломами оптического излучения[[4]](#footnote-4). Поэтому практически в спецификациях чувствительность приемника задается только для вполне определенного передатчика, скорости передачи двоичных сигналов и их формы. С увеличением скорости передачи информации чувствительность ухудшается (т.е. возрастает) в линейных единицах приблизительно пропорционально скорости B [бит/с]. Чувствительность современных цифровых высокоскоростных приемников на основе in-фотодиодов определяется тепловыми шумами трансимпедансного усилителя. В отсутствии шумов чувствительность фотоприемника определяется квантовыми свойствами светового излучения и называется квантовым пределом чувствительности.

Итак,  была  рассмотрена  общая схема передачи сообщений. Полученные на выходе   устройств преобразования  сообщения в сигналы  первичные  сигналы должны   быть  переданы   системой электросвязи,  т.е. сигнал есть объект транспортировки,    а   техника   связи   есть    по   существу  техника транспортировки   (передачи)  сигнала.   Для  передачи сигнала в системе электросвязи    необходимо   воспользоваться   переносчиков,   в  качестве которого   возможно   использование   тех   материальных  объектов, которые имеют   свойство   перемещаться   в   пространстве.  Т.е.  в пункте  передачи первичный   сигнал   необходимо   преобразовать  в сигнал, удобный для его передачи   по   соответствующей среде распространения, но наделенный в то же   время   признаками  первичного сигнала. В пункте приема выполняется обратное преобразование[[5]](#footnote-5).

ГЛАВА II

2.1. Основные принципы цифровой системы передачи данных

Структура первичной сети предопределяет объединение и разделение потоков передаваемой информации, поэтому используемые на ней системы передачи строятся по *иерархическому принципу*. Применительно к цифровым системам этот принцип заключается в том, что число каналов цифровой системы передачи (далее – ЦСП), соответствующее данной ступени иерархии, больше числа каналов ЦСП предыдущей ступени в целое число раз.

Аналоговые системы передачи с ЧРК также строятся по иерархическому принципу, но в отличие от ЦСП для них ступенями иерархии являются не сами системы передачи, а типовые группы каналов. Цифровая система передачи, соответствующая первой ступени иерархии, называется *первичной*; в этой ЦСП осуществляется прямое преобразование относительно небольшого числа первичных сигналов в первичный цифровой поток. Системы передачи второй ступени иерархии объединяют определенное число первичных потоков во вторичный цифровой поток и т.д.

В рекомендациях МСЭ-Т представлено два типа иерархий ЦСП: *плезиохронная цифровая иерархия* PDH и *синхронная цифровая иерархия* SDH. Первичным сигналом для всех типов ЦСП является цифровой поток со скоростью передачи 64 кбит/с, называемым *основным цифровым каналом*(ОЦК). Для объединения сигналов ОЦК в групповые высокоскоростные цифровые сигналы используется принцип *временного разделения каналов*.

Новые технологии телекоммуникаций стали развиваться в связи с переходом от аналоговых к циф­ровым методам передачи данных, основанных на импульсно-кодовой модуляции (далее - ИКМ) и мультиплексировании с временным разделе­нием каналов. В плезиохронной цифровой иерархии PDH мультиплексор сам выравнивает скорости входных потоков путем добавления нужного числа выравнивающих бит в каналы с меньшими скоростями передачи. Отсюда следовали недостатки PDH - невозможность вывода потока с меньшей скоростью из потока с большей скоростью передачи без полного демультиплексирования этого потока и удаления выравнивающих бит. Недостатки PDH вызвали необходимость в разработке синхронной цифровой иерархии SDH, которая позволила вводить/выводить входные потоки без необходимости проводить их сборку/разборку и систематизировать иерархический ряд скоростей передачи.

SDH имеет следующие преимущества перед PDH :

* упрощение сети,вызванное возможностью вводить/выводить цифровые потоки без их сборки или разборки как в PDH;
* помехозащищенность- сеть ис­пользует волоконно-оптические кабели (BOК), передача по которым практически не подвержена действию электромагнитных помех;
* выделение полосы пропускания по требованию *-* этот сервис теперь может быть предоставлен в считанные секунды путем переключения на другой (широкополосный) канал;
* прозрачность для передачи любого трафика *-* факт, обусловленный использованием виртуаль­ных контейнеров для передачи трафика, сформированного другими технологиями, включая самые современные технологии Frame Relay, ISDN и ATM;
* универсальность применения *-* технология используется для создания глобаль­ных сетей или глобальной магистрали и для корпоративной сети, объединяющей десятки локаль­ных сетей;
* простота наращивания мощности *-* при наличии универсальной стойки для размещения аппарату­ры переход на следующую более высокую скорость иерархии можно осуществить просто вынув одну группу функциональных блоков и вставив новую (рассчитанную на большую скорость) группу блоков.

SDH позволяет организовать *универсальную транспортную систему*, охватывающую все участки сети и выполняющую функции как передачи информации, так и контроля и управления. Она рассчитана на транспортирование всех сигналов PDH, а также всех действующих и перспективных служб, в том числе и широкополосной цифровой сети с интеграцией служб (ISDN), использующей асинхронный способ переноса (АТМ).

Линейные сигналы SDH организованы в так называемые *синхронные транспортные модули* STM (Synchronous Transport Module) (См. Табл. 1.1). Первый из них - STM-1 - соответствует скорости передачи информации 155 Мбит/с. Каждый последующий имеет скорость в 4 раза большую, чем предыдущий, и образуется побайтным синхронным мультиплексированием. В настоящее время эксплуатируются или раз­рабатываются SDH системы со скоростями, соответствующими окончательной версии SDH иерар­хии*:* STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, STM-256 или 155,52, 622,08, 2488,32, 9953,28, 39813,12 Мбит/с. Три первых уровня (называемых по-старому первым, четвертым и шестнадцатым) были стандартизованы в последней версии ITU-T Rec. G.707.

Таблица 1.1.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Уровень | Модуль | Скорость передачи |
| 1 | STM-1 | 155,52 Мбит/с |
| 4 | STM-4 | 622,08 Мбит/с |
| 16 | STM-16 | 2488,32 Мбит/с |
| 64 | STM-64 | 9953,28 Мбит/с |
| 256 | STM-256 | 39813,12 Мбит/с |

Мультиплексирование STM-1 в STM-N или STM-N в STM-4\*N осуществляется непосредственно по следующей схеме: . Увеличение скорости передачи приводит к уменьшению длительности импульсного сигнала. Т.к. при распространении по ОВ происходит «размывание» и «наплывание» импульсов друг на друга, при слишком длинной ВОЛС приемник излучения уже не может распознать отдельные импульсы. В результате усиливаются требования к ВОЛС по дисперсии, которая и определяет увеличение длительности.

В теории электросвязи существует несколько способов увеличения пропускной способности систем передачи информации. Большинство из них сводится к одному из методов уплотнения компонентных информационных потоков в один групповой, который передается по линии связи.

Метод временного мультиплексирования (ТDМ)

В настоящее время метод временного уплотнения информационных потоков (TDM — Time Division Multiplexing) является наиболее распространенным. Он применяется при передаче информации в цифровом виде. Суть его состоит в следующем. Процесс передачи разбивается на ряд временных циклов, каждый из которых в свою очередь разбивается на *N* субциклов, где *N* — число уплотняемых потоков (или каналов). Каждый субцикл подразделяется на временные позиции, т.е. временные интервалы, в течение которых передается часть информации одного из цифровых мультиплексируемых потоков. Кроме того, некоторое число позиций отводится для идентификационных синхроимпульсов, вставок и цифрового потока служебной связи.

Метод временного уплотнения подразделяется на два вида — асинхронное или плезиохронное, временное мультиплексирование (PDH, ATM) и синхронное временное мультиплексирование (SDH). Современные технологии позволяют обеспечить скорость передачи группового сигнала 10 Гбит/с (STM-64). Несколько лет назад считалось, что это предел для электронных устройств мультиплексирования. Однако, благодаря развитию новых электронных технологий (полупроводниковые структуры на основе арсенида галлия, микровакуумных элементов) уже созданы лабораторные образцы электронных мультиплексоров для скорости 40 Гбит/с (STM-256), подготовленные для серийного промышленного производства. Научные исследования в этой области продолжаются с целью дальнейшего увеличения скорости передачи.

Метод частотного уплотнения (FDM)

При частотном методе мультиплексирования (FDM — Frequency Division Multiplexing) каждый информационный поток передается по физическому каналу на соответствующей частоте — поднесущей *ѓ*пн. Если в качестве физического канала выступает оптическое излучение — оптическая несущая, то она модулируется по интенсивности групповым информационным сигналом, спектр которого состоит из ряда частот поднесущих, количество которых равно числу компонентных информационных потоков. Частота поднесущей каждого канала выбирается исходя из условия *ѓ*пн ≥ 10*ѓ*вчп, где *ѓ*пн — частота поднесущей, *ѓ*вчп — верхняя частота спектра информационного потока. Частотный интервал между поднесущими *Δƒ*пн выбирается из условия *Δƒ*пн ≥ *ѓ*вчп.

На приемной стороне оптическая несущая попадает на фотодетектор, на нагрузке которого выделяется электрический групповой поток, поступающий после усиления в широкополосном усилителе приема на входы узкополосных фильтров, центральная частота пропускания которых равна одной из поднесущих частот.

В качестве компонентных потоков могут выступать как цифровые, так и аналоговые сигналы, В настоящее время в кабельных системах передачи частотное уплотнение применяется в многоканальном кабельном телевидении, где для этой цели отведен диапазон частот 47 - 860 МГц, т.е. как метровый, так и дециметровый диапазоны ТВ.

Уплотнение по поляризации (PDM)

Уплотнение потоков информации с помощью оптических несущих, имеющих линейную поляризацию, называется уплотнением по поляризации (PDM — Polarization Division Multiplexing). При этом плоскость поляризации каждой несущей должна быть расположена под своим углом. Мультиплексирование осуществляется с помощью специальных оптических призм, например, призмы Рошона. Поляризационное мультиплексирование возможно только тогда, когда в среде передачи отсутствует оптическая анизотропия, т.е. волокно не должно иметь локальных неоднородностей и изгибов. Это одна из причин весьма ограниченного применения данного метода уплотнения. В частности, он применяется в оптических изоляторах, а также в оптических волоконных усилителях, которые используются в устройствах накачки эрбиевого волокна для сложения излучения накачки двух лазеров, излучение которых имеет выраженную поляризацию в виде вытянутого эллипса.

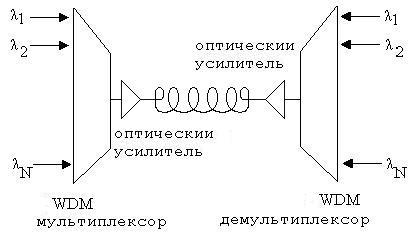
Многоволновое мультиплексирование оптических несущих (WDM)

Решение задачи дальнейшего роста пропускной способности ВОСП путем увеличения скорости передачи при помощи TDM ограничивается не только технологическими сложностями при электронном временном уплотнении, но и ограничениями, вызванными временной (хроматической) дисперсией оптических импульсов в процессе их распространения в ОВ. Это наглядно видно из сопоставления допустимых величин хроматической дисперсии для систем передачи STM-16 и STM-64 соответственно: 10500 пс/нм и 1600 пс/нм и поляризационной модовой дисперсии — 40 пс и 10 пс.

Указанная выше задача успешно решается с помощью оптического мультиплексирования с разделением по длинам волн — WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть этого метода состоит в том, что *m* информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей на длине волны *λ*m и разнесенных в пространстве, с помощью специальных устройств — оптических мультиплексоров (ОМ) — объединяются в один оптический поток *λ*1..*λ*m, после чего он вводится в оптическое волокно. На приемной стороне производится обратная операция демультиплексирования. Примерная структурная схема такой системы с WDM представлена на рис. 1.1.

Оптические параметры систем WDM регламентируются рекомендациями, в которых определены длины волн и оптические частоты для каждого канала. Согласно этим рекомендациям, многоволновые системы передачи работают в 3-ем окне прозрачности ОВ, т.е. в диапазоне длин волн 1530-1565 нм. Для этого установлен стандарт длин волн, представляющий собой сетку оптических частот, в которой расписаны регламентированные значения оптических частот в диапазоне 196,1-192,1 ТГц с интервалами 100 ГГц и длины волн - 1528,77-1560,61 нм с интервалом 0,8 нм. Стандарт состоит из 41 длины волны, т.е. рассчитан на 41 спектральный канал. Но на практике используется 39 каналов из представленной сетки частот, поскольку два крайних не используются, так как они находятся на склонах частотной характеристики оптических усилителей, применяемых в системах WDM.

Рис. 1.1. Простейшая структурная схема системы передачи WDM.



В последнее время установилась четкая тенденция уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50 ГГц и даже до 25 ГГц, что приводит к более плотному расположению спектральных каналов в отведенном диапазоне длин волн (1530-1565 нм). Такое уплотнение получило название DWDM. Очевидно, что DWDM вызвано стремлением увеличить количество передаваемых каналов. Отметим также, что в настоящее время аббревиатура DWDM закрепилась и для систем с многоволновым уплотнением, у которых частотный интервал между каналами равен 100 ГГц.

В настоящее время в оборудовании систем связи с DWDM, рассчитанных для передачи до 32-х каналов, ряд фирм применяет длину волны 1510 нм, а некоторые — 1625 нм. Но с увеличением количества передаваемых каналов до 128 и более возникает необходимость освоения более длинноволновой части оптического спектра, в частности L-диапазона (или 4-е окно прозрачности ОВ), в который будет входить длина волны 1625 нм.

Создание систем передачи DWDM потребовало разработки целого ряда как активных, так и пассивных квантовых и оптических элементов и устройств с высокостабильными параметрами. Сюда относятся полупроводниковые лазеры с узкой спектральной шириной линии излучения (менее 0,05 нм) при стабильности не хуже ± 0,04 нм. Волоконно-оптические усилители должны иметь стабильный коэффициент усиления, малую неравномерность коэффициента усиления, (< ± 0,5 дБ) во всем спектральном диапазоне усиления и ряд других характеристик. Среди пассивных элементов наиболее ответственными являются оптические мультиплексоры/ демультиплексоры для большого количества каналов при работе в одном окне прозрачности (1530-1565 нм). Расстройка по длине волны этих элементов не должна превышать 0,05 нм. Такая стабильность обеспечивается жесткой температурной стабилизацией этих элементов с точностью не хуже ± 1°С. Все это резко повышает стоимость систем DWDM.

2.2. Процессы, происходящие в оптическом волокне, и их влияние на скорость и дальность передачи информации

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) информация передается электромагнитными волнами высокой частоты, около 200 ТГц, что соответствует ближнему инфракрасному диапазону оптического спектра 1500 нм. Волноводом, переносящим информационные сигналы в ВОСП, является оптическое волокно (ОВ), которое обладает важной способностью передавать световое излучение на большие расстояния с малыми потерями. Потери в ОВ количественно характеризуются затуханием. Скорость и дальность передачи информации определяются искажением оптических сигналов из-за дисперсии и затухания. Волоконно-оптическая сеть - это информационная сеть, связую­щими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Основания так считать вытекают из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам:

* + широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей Гц. Это означает, что по оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка бит/с (1Тбит/с). Говоря другими словами, по одному волокну можно передать одновременно 10 миллионов телефонных разговоров и миллион видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как световые волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться световые сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. На сегодняшний день предел по плотности передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут;
  + очень малое (по сравнению с другими средами) затухание светового сигнала в оптическом волокне. Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более «прозрачные», так называемые фторцирконатные оптические волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с;
  + ОВ изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди;
  + оптические волокна имеют диаметр около 100 мкм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике;
  + т.к. оптические волокна являются диэлектриками, следовательно, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. В оптической системе они электрически полностью изолированы друг от друга, и многие проблемы, связанные с заземлением и снятием потенциалов, которые до сих пор возникали при соединении электрических кабелей, теряют свою актуальность. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие преграды;
  + системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам, а передаваемая по световодам информация защищена от несанкционированного доступа. Волоконно-оптические линии связи нельзя подслушать неразрушающим способом. Всякие воздействия на ОВ могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии;
  + важное свойство оптического волокна - долговечность. Время жизни волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет проложить волоконно-оптический кабель один раз и, по мере необходимости, наращивать пропускную способность канала путем замены приемников и передатчиков на более быстродействующие.

Но существуют также некоторые недостатки волоконно-оптических технологий:

* + при создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет, и свет в электрические сигналы. Для соединения ОВ с приемо-передающим оборудованием используются оптические коннекторы (соединители), которые должны обладать малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Погрешности при изготовлении таких элементов линии связи должны быть порядка доли микрона, т.е. соответствовать длине волны излучения. Поэтому производство этих компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее;
  + другой недостаток заключается в том, что для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а потому дорогое, технологическое оборудование.

Как следствие, при аварии (обрыве) оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при работе с медными кабелями. Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) настолько значительны, что, несмотря, на перечисленные недостатки оптического волокна, эти линии связи все шире используются для передачи информации.

Одним из важнейших компонентов ВОЛС является волоконно-оптический кабель (ВОК). Определяющими параметрами при производстве ВОК являются условия эксплуатации и пропускная способность линии связи.

По условиям эксплуатации кабели подразделяют на:

* монтажные;
* станционные;
* зоновые;
* магистральные.

Первые два типа кабелей предназначены для прокладки внутри зданий и сооружений. Они компактны, легки и, как правило, имеют небольшую строительную длину.

Кабели последних двух типов предназначены для прокладки в колодцах кабельных коммуникаций, в грунте, на опорах вдоль ЛЭП, под водой. Эти кабели имеют защиту от внешних воздействий и строительную длину более двух километров. Для обеспечения большой пропускной способности линии связи производятся ВОК, содержащие небольшое число (до 8) одномодовых волокон с малым затуханием, а кабели для распределительных сетей могут содержать до 144 волокон как одномодовых, так и многомодовых, в зависимости от расстояний между сегментами сети.

При изготовлении ВОК в основном используются два подхода:

* конструкции со свободным перемещением элементов;
* конструкции с жесткой связью между элементами.

По видам конструкций различают кабели повивной скрутки, пучковой скрутки, кабели с профильным сердечником, а также ленточные кабели. Существуют многочисленные комбинации конструкций ВОК, которые в сочетании с большим ассортиментом применяемых материалов позволяют выбрать исполнение кабеля, наилучшим образом удовлетворяющее всем условиям проекта, в том числе - стоимостным.

Особый класс образуют кабели, встроенные в грозозащитный трос (оптические волокна укладываются в стальные трубки, которые заменяют провод заземления), используемые для подвески на опорах воздушных линий электропередачи. Такие кабели характеризуются способностью выдерживать высокие механические и электрические нагрузки, обладают высокой молниестойкостью и высокой стойкостью к вибрации, и предназначены для соединения электростанций и станций управления, используя действующие высоковольтные линии.

Соединение оптических волокон

Развитие волоконно-оптических телекоммуникационных технологий в основном определяется качеством волоконно-оптических кабелей (ВОК) на многомодовых и одномодовых оптических волокнах, изготовленных методом покрытия кварцевой жилы полимерными или кварцевыми материалами. Некоторые из этих волокон в настоящее время по ряду характеристик приблизились к предельно возможным показателям. Так, одномодовое волокно с рабочей длиной волны 1,55 мкм практически достигло предела по затуханию, равного 0,154 дБ/км. Это позволило в настоящее время строить регенерационные участки длиной до 200 км и более, снижая тем самым затраты на строительство волоконно-оптических линий связи. Однако ввиду естественных ограничений производить волокна таких длин не представляется возможным. Поэтому осуществляют соединение оптических волокон, называя участок между соединениями строительной длиной. Снижение коэффициента затухания оптического волокна обуславливает ужесточение требований к качеству соединений. Это объясняется тем, что число таких соединений, как правило, достаточно велико. Иные требования предъявляются к устройствам соединения волоконно-оптических кабелей, предназначенных для локальных сетей, имеющих небольшие длины участков. Данные устройства должны быть компактными, допускать многоразовое соединение и отличаться простотой выполнения соединения.

### Оптическое волокно. Общие положения

Важнейший из компонентов ВОЛС - оптическое волокно. Для передачи сигналов применяются два вида волокна: одномодовое и многомодовое. Свое название волокна получили от способа распространения в них излучения.

Оптическое волокно (рис. 2.1) состоит из*сердцевины*, по кото­рой происходит распространение световых волн, и *оболочки,* предназначенной, с од­ной стороны, для создания лучших усло­вийотражения на границе раздела «серд­цевина - оболочка», а с другой - для снижения излучения энергии в окружаю­щее пространство. С целью повышения прочности и тем самым надежности волок­наповерх оболочки, как правило, накла­дываются*защитные упрочняющие покрытия.*

Рис 2.1. Общий вид типового ОВ.

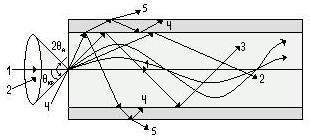


Такая конструкция ОВ используется в большинстве оптических кабелей (ОК) в качестве базовой. Сердцевина изготавливается из оптически более плотного материала. Оптические волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины, т.е. зависимостью показателя преломления от расстояния от оси ОВ (см. рис 2.3).

Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber). В многомодовых ОВ, имеющих диаметр светонесущей жилы на порядок больше длины волны передачи, распространяется множество различных типов световых лучей - мод. Многомодовые волокна разделяются по профилю показателя преломления на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber).

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

Рис. 2.2. Распространение излучения по ступенчатому и градиентному многомодовым и одномодовому ОВ.



Принцип распространения оптического излучения вдоль оптического волокна основан на явлении полного внутреннего отражения на границе сред с разными показателями преломления. Процесс распространения световых лучей в оптически более плотной сре­де, окруженной менее плотной показан на рис. 2.2. Угол полного внутреннего отражения, при котором падающее на границу оптически более плотной и оптически менее плотной сред излучение полностью отражается, определяется соотношением:

, (2.3.1)

где *n1* - показатель преломления сердцевины ОВ, *n2* - показатель преломления оболочки ОВ, причем *n1* > *n2*. При попадании светового излучения на торец ОВ в нем могут распространяться три типа световых лучей, называемые *направляемыми, вытекающими* и *излу­чаемыми* лучами, наличие и преобладание какого-либо типа лучей определяется углом их падения на гра­ницу раздела «сердцевина - оболочка». Те лучи, которые падают на границу раздела под углом  (лучи 1, 2 и 3), отражаются от нее и вновь воз­вращаются в сердцевину волокна, распространяясь в ней и не претерпевая преломления. Так как траектории таких лучей полностью расположены внутри среды распространения — сердцевины волокна, они распространя­ются на большие расстояния и называются направляемыми.

Лучи, падающие на границу раздела под углами  (лучи 4), носят название вытекающих лучей (лучейоболочки). Достигая грани­цы «сердцевина - оболочка», эти лучи отражаются и преломляются, теряя каждый раз в оболочке волокна часть энергии, в связи с чем исчезают вовсе на некотором расстоянии от торца волокна. Лучи, которые излучаются из оболочки в окружающее пространство (лучи 5), носят название излучаемых лучей и возникают в местах нерегулярностей или из-за скручивания ОВ. Излучаемые и вытекающие лучи являются паразитными и приводят к рассеиванию энергии и искажению информационного сигнала.

В общем случае распространение электромагнитных волн описывается системой уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

 (2.4.1)

где - плотность электрического заряда,  и  – напряженности электрического и магнитного полей соответственно, – плотность тока,  и  – электрическая и магнитная индукции.

Если представить напряженность электрического и магнитного поля  и  при помощи преобразования Фурье:

, (2.4.2)

то волновые уравнения примут вид:

, (2.4.3)

где  - оператор Лапласа.

Световод можно представить идеальным цилиндром с продольной осью *z*, оси *х* и *у* в поперечной (*ху*) плоскости образуют горизонтальную (*xz*) и вертикальную (*xz*) плоскости. В этой системе существуют 4 класса волн (*Е* и *Н* ортогональны):

поперечные *Т*: *E*z = *Н*z = 0; *Е* = *Е*y; *Н* = *Н*x;

электрические *Е*: *Е*z = 0, *Н*z = 0; *Е* = (*Е*y , *Е*z) - распространяются в плоскости (*yz*); *Н* = *Н*x ;

магнитные *Н*: *Н*z = 0, *Е*z = 0; *Н* = (*Н*x , *Н*z) - распространяются в плоскости (*xz*), *E* = *E*z;

смешанные *ЕН* или *НЕ*: *Е*z = 0, *Н*z = 0; *Е* = (*Е*y , *Е*z), *Н* = (*Н*x , *Н*z) - распространяются в плоскостях (*xz*) и (*yz*).

При решении системы уравнений Максвелла удобнее использовать цилиндрические координаты (*z, r, φ*), при этом решение ищется в виде волн с компонентами *E*z , *Н*z вида:

, (2.4.4)

где  и  - нормирующие постоянные,  - искомая функция,  - продольный коэффициент распространения волны.

Решения для  получаются в виде наборов из *m* (появляются целые индексы *m*) простых функций Бесселя  для сердцевины и модифицированных функций Ханкеля  для оболочки, где  и  - поперечные коэффициенты распространения в сердцевине и оболочке соответственно,  - волновое число. Параметр  определяется как решение характеристического уравнения, получаемого из граничных условий, требующих непрерывности тангенциальных составляющих компонент *E*z и *Н*z электромагнитного поля на границе раздела сердцевины и оболочки. Характеристическое уравнение, в свою очередь, дает набор из *n* решений (появляются целые индексы *n*) для каждого целого *m*, т.е. имеем  собственных значений, каждому из которых соответствует определенный тип волны, называемый *модой*. В результате формируется набор мод, перебор которых основан на использовании двойных индексов.

Условием существования направляемой моды является экспоненциальное убывание ее поля в оболочке вдоль координаты *r* , что определяется значением поперечного коэффициента распространения в оболочке. При = 0 устанавливается критический режим, заключающийся в невозможности существования направляемой моды, что соответствует:

. (2.4.5)

Последнее уравнение имеет бесчисленное множество решений:



(2.4.6)

Введем величину, называемую нормированной частотой *V*, которая связывает структурные параметры ОВ и длину световой волны, и определяемую следующим выражением:

**, (2.4.7)

При = 0 для каждого из решений уравнения (2.4.5) имеет место критическое значение нормированной частоты  (*m* = 1, 2, 3…, *n* = 0, 1, 2, 3…):

  и т.д.

Для моды *HE11* критическое значение нормированной частоты . Эта мода распространяется при любой частоте и структурных параметрах волокна и является фундаментальной модой ступенчатого ОВ. Выбирая параметры ОВ можно добиться режима распространения только этой моды, что осуществляется при условии:

** (2.4.8)

Минимальная длина волны, при которой в ОВ распространяется фундаментальная мода, называется волоконной длиной волны отсечки. Значение определяется из последнего выражения как:

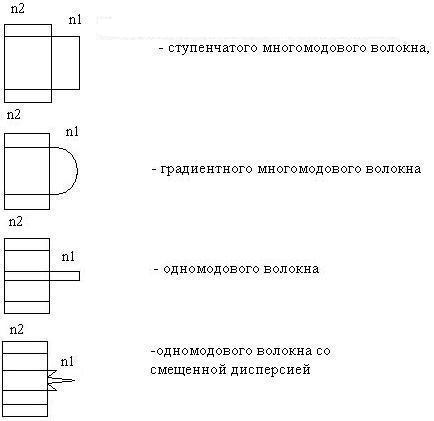
** (2.4.9)

### Одномодовые оптические волокна

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

*В ступенчатом одномодовом оптическом волокне* (SF) (рис. 2.3) диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света *λ* > *λ*CF (*λ*CF - длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в оптическом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспе­чивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрач­ности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестно­сти длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3 - 0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,20 - 0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

Рис. 2.3. Профили показателя преломления



*В одномодовом оптическом волокне со смещенной дисперсией* (DSF) (рис. 2.3) длина волны, на которой дисперсия обращается в ноль, - длина волны нулевой дисперсии λ0 - смеще­на в окно прозрачности 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показате­ля преломления волокна. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики, как по минимуму дисперсии, так и по минимуму по­терь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 и более км. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к: 1550 нм.

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

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

В ВОЛС наиболее широко используются следующие стандарты волокон:

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

### Константа распространения и фазовая скорость

Волновое число *k* можно рассматривать как вектор, направление которого совпадает с направлением распространения света в объемных средах. Этот вектор называется волновым вектором. В среде с показателем преломления  величина волнового вектора равна . В случае распространения света внутри волновода направление распространения света совпадает с направлением проекции *β* волнового вектора *k*, на ось волновода:

 (2.6.1)

где  - угол, дополняющий угол *i* до 90 (или угол между лучом и осью, как показано на рис. 2.4), *β* называется константой распространения и играет такую же роль в волноводе как волновое число *k* в свободном пространстве. Т.к. , то в соответствии с (ф. 2.6.1)  и *i* зависят от длины волны.

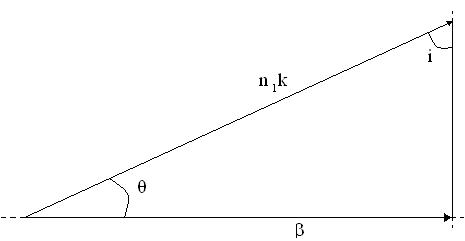


Рис. 2.4. Волновой вектор и константа распространения

Угол падения  изменяется между  и π/2. Следовательно:

 (2.6.2)

Таким образом, величина константы распространения внутри волновода всегда лежит между значениями волновых чисел плоской световой волны в материале сердцевины и оболочки. Если учесть, что , то можно переписать это соотношение на языке фазовых скоростей:

 (2.6.3)

Фазовые скорости распространения мод  заключены между фазовыми скоростями волн в двух объемных материалах.

Скорость распространения светового сигнала или групповая скорость - это скорость распространения огибающей светового импульса. В общем случае групповая скорость *u* не равна фазовой скорости. Различие фазовых скоростей мод приводит к искажению входного пучка света по мере его распространения в волокне.

В волокне с параболическим градиентным показателем преломления наклонные лучи распространяются по криволинейной траектории, которая, естественно, длиннее, чем путь распространения аксиального луча. Однако из-за уменьшения показателя преломления по мере удаления от оси волокна, скорость распространения составляющих светового сигнала при приближении к оболочке оптического волокна возрастает, так что в результате этого время распространения составляющих по ОВ оказывается примерно одинаковым. Таким образом, дисперсия или изменение времени распространения различных мод, сводится к минимуму, а ширина полосы пропускания волокна увеличивается. Точный расчет показывает, что разброс групповых скоростей различных мод в таком волокне существенно меньше, чем в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Оптические волокна, которые могут поддерживать распространение только моды самого низкого порядка, называются одномодовыми.

Таким образом, каждая мода, распространяющаяся в ОВ, характеризуется постоянным по длине световода распределением интенсивности в поперечном сечении, постоянной распространения *β*, а также фазовой *v* и групповой *u* скоростями распространения вдоль оптической оси, которые различны для разных мод. Из-за различия фазовых скоростей мод волновой фронт и распределение поля в поперечном сечении изменяются вдоль оси волокна. Из-за различия групповых скоростей мод световые импульсы расширяются, и это явление называется межмодовой дисперсией.

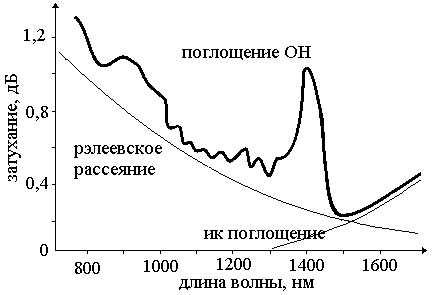
В одномодовом волокне существует только одна мода распространения, поэтому такое волокно характеризуется постоянным распределением поля в поперечном сечении, в нем отсутствует межмодовая дисперсия, и оно может передавать излучение с очень широкой полосой модуляции, ограниченной только другими видами дисперсии.

### Затухание оптического волокна

По мере распространения света в оптической среде он ослабевает, что носит название затухания среды — *затухания* ОВ. Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передача сигналов по волокну осуществляется в трех диапазонах: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность. Затухание (рис. 3.1) обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне:

* рэлеевское рассеяние;
* рассеяние на дефектах волокна;
* собственное поглощение кварцевого стекла;
* примесное поглощение;
* поглощение на микро и макроизгибах.

Рис. 3.1. Затухание.



Степень потерь определяет­ся *коэффициентом затухания* *,* который в общем виде равен:

 (3.1.1)

где  *—* коэффициент затухания, обусловленный потерями на поглощение световой энергии. Собственное поглощение кварцевого стекла определяется поглощением фотонов при котором энергия фотона переходит в энергию электронов или в колебательную энергию решетки. Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ( < 0,4 мкм). Спектр поглощения решетки лежит в инфракрасной области ( > 7 мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в ди8=]апазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км.

— коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским рассеиванием на неоднородностях материала ОВ, размеры которых значительно меньше длины световой волны, и тепловыми флуктуациями показателя преломления. Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра. Рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают в структуре кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны .

— ко­эффициент затухания, вызванный присутствующими в ОВ примесями, приводящими к дополнительному поглоще­нию оптической мощности, это ионы металлов (Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), вызывающие поглощение в диапазоне длин волн 0,6-1,6 мкм, и гидроксильные группы (ОН), из-за которых появляются резонансные всплески затухания  на длинах волн 0,75 мкм, 0, 97 мкм и 1,39 мкм.

 — дополнительные потери, определяемые деформацией ОВ в процессе изготовления кабеля, вызванной скруткой, изгибом, отклонением от прямолинейного расположения и термомеханическими воздействиями, имеющими место при наложении оболочек и покрытий на сердцевину волокна при изготовлении ОК (их называют кабельными).

— коэффициент затухания, зависящий от длины волны оптического из­лучения и за счет поглощения в инфракрасной области возрастающий в показательной степени с ростом длины волны.

В настоящее время в технике связи в основном применяются квар­цевые ОВ, область эффективного использования которых находится в диапазоне длин волн до 2 мкм*.* На более длинных волнах в качестве материала для волокна используются галоидные, халькогенидные и фторидные стекла. По сравнению с кварцевыми волокнами они обладают большей прозрачностью и обеспечивают снижение потерь на несколько порядков. С появлением ОВ из новых материалов становится реальным создание ВОЛС без ретрансляторов.

Затухание оптического волновода учитывается при расчете энергетического бюджета.

Затухание оптоволоконной линии с учетом потерь на разъемных соединениях и сростках (неразъемных соединениях) определяется по формуле:

 (3.1.2)

где  и  - значение потерь на сростке и разъеме соответственно,  и  - количество сростков и разъемных соединений на протяжении оптоволоконной линии длиной *L*,  - километрический коэффициент затухания оптического волокна, измеряемый в дБ/км.

Тогда энергетический бюджет рассчитывается по формуле:

 (3.1.3)

где  и - мощность источника оптического излучения и чувствительность фотоприемника в дБ соответственно;  и  - эксплуатационный запас для аппаратуры и для кабеля, (дБ), которые берутся из технических условий (контрактных спецификаций) для оборудования ВОЛС.

### Дисперсия

Световой сигнал в цифровых системах передачи поступает в световод импульсами, которые вследствие некогерентности реальных источников излучения содержат составляющие с различной частотой. Уширение светового импульса, вызываемое различием времени распространения его спектральных и поляризационных компонент, и называется дисперсией.

Световая волна, распространяющаяся вдоль направления *x*, описывается уравнением:

 (3.2.1)

где *А* - амплитуда световой волны; - ее угловая частота, *k* - волновое число.

Если взять фиксированное значение фазы волны:

=const, (3.2.2)

то скорость перемещения фазы в пространстве или *фазовая скорость* будет:

. (3.2.3)

Световой импульс, распространяющийся в ОВ представляет собой суперпозицию электромагнитных волн с частотами, заключенными в интервале Δ, которая называется *группой волн* вида (3.2.1). В момент времени *t* в разных точках для разных *x* волны будут усиливать друг друга, что приводит к появлению максимума интенсивности группы волн (*центр группы волн*), или ослаблять. Центр группы волн перемещается со скоростью:

, (3.2.4)

называемой *групповой*. Заменив *k*=2*π/λ* и выразив , получим соотношение, выражающее зависимость групповой скорости от длины волны:

. (3.2.5)

Это и является причиной, приводящей к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра по оптическому волокну. В результате по мере распространения по оптическому волокну частотные составляющие достигают приемника в разное время. Вследствие этого импульсный сигнал на выходе ОВ видоизменяется, становясь «размытым». Это явление называется *волноводной дисперсией*, определяемой показателем преломления ОВ и шириной спектра излучения источника *Δλ* и имеющей размерность времени:

 (3.2.6)

где *Δ* - относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки, *L* - длина ОВ, - коэффициент волноводной дисперсии, называемый удельной волноводной дисперсией. Зависимость удельной волноводной дисперсии от длины волны показана на рис. 3.2.

Скорость распространения волны зависит не только от частоты, но и от среды распространения. Для объяснения этого явления электроны внутри атомов и молекул рассматриваются в теории дисперсии квазиупруго связанными. При прохождении через вещество световой волны каждый электрон оказывается под воздействием электрической силы и начинает совершать вынужденные колебания. Колеблющиеся электроны возбуждают вторичные волны, распространяющиеся со скоростью *с*, которые, складываясь с первичной, образуют результирующую волну. Эта результирующая волна распространяется в веществе с фазовой скоростью *v*, причем, чем ближе частота первичной волны к собственной частоте электронов, тем сильнее будут вынужденные колебания электронов и различие между *v* и *c* будет больше, что объясняет зависимость . В результате смещения электронов из положений равновесия молекула вещества приобретает электрический дипольный момент. То есть при взаимодействии электромагнитной волны со связанными электронами отклик среды зависит от частоты светового импульса, что и определает зависимость показателя преломления от длины волны, которая характеризует дисперсионные свойства оптических материалов:

, (3.2.7)

где *N* - плотность частиц (число частиц в единице объема), *m* и *е* – масса и заряд электрона соответственно,  - резонансные длины волн,  - вынуждающие осцилляции электрические силы. В широком спектральном диапазоне, включающем обычный ультрафиолет, видимую область и ближнюю инфракрасную область, кварцевое стекло прозрачно и данная формула Солмейера применима с очень высокой точностью.

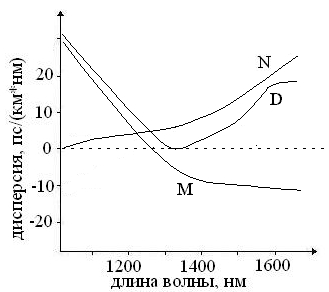
Явление, возникновение которого связано с характерными частотами, на которых среда поглощает электромагнитное излучение вследствие осцилляции связанных электронов, и которое определяет уширение длительности светового импульса после его прохождения через дисперсионную среду, называется в технике волоконно-оптической связи *материальной дисперсией*:

 (3.2.8)

где коэффициент *М*(*λ*) называется удельной материальной дисперсией. На длине волны *λ* = 1276 нм у кварца величина , следовательно коэффициент материальной дисперсии *M*(*λ*) = 0 (см. рис. 3.2). При длине волны *λ* > 1276 нм *M*(*λ*) меняет знак и принимает отрицательные значения, в результате чего на длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация *М*(*λ*) и *N*(*λ*). Длина волны, при которой это происходит, называется *дли­ной волны нулевой дисперсии* . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пре­делах которых может варьироваться  для данного конкретного оптического волокна.

Результирующая дисперсия складывается из волноводной и материальной и называется *хроматической дисперсией*. Дисперсию в оптических волокнах принято характеризовать коэффициентом дисперсии или удельной дисперсией, измеряемом в пс/(нм·км). Коэффициент дисперсии численно равен увеличению длительности светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения отрезка ОВ длиной 1 км. Значение коэффициента хроматической дисперсии определяется как *D*(*λ*) = *М*(*λ*) + *N*(*λ*). Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км).

Рис. 3.2. Зависимости коэффициентов волноводной, материальной и результирующей хроматической дисперсии от длины волны.



При допущениях, которые исходят из результатов опытов для различных веществ, из выражения (3.2.7) может быть получена приближенная формула зависимости показателя преломления от длины волны:

 (3.2.9)

где *a*, *b* и *c* - постоянные, значения которых определяются экспериментально для каждого вещества.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного оптических волокон для расчета дисперсии применима эмпирическая формула Селмейера:

 (3.2.10)

Коэффициенты *А*, *В*, *С* являются подгоночными и определяются для каждого материала ОВ экспериментальным путем. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:

 (3.2.11)

где - длина волны нулевой дисперсии, новый параметр *S0* =8*В* - наклон нуле­вой дисперсии (размерность пс/(нм2·км), а *λ* - рабочая длина волны, для которой определя­ется удельная хроматическая дисперсия.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым со­отношением:

 (3.2.12)

К уменьше­нию хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков, и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии.

### Распространение световых импульсов в среде с дисперсией

Электрическое поле линейно поляризованного светового сигнала, распространяющегося в одномодовом волокне, можно описать следующим образом:

, (3.3.1)

где  - единичный вектор, - медленно меняющаяся амплитуда (огибающая) светового импульса, представляющая собой комплексный скаляр, который изменяется в направлении z и во времени *t*, *u*(*х,у*) - распределение амплитуды поля в поперечном направлении,  - постоянная распространения,  - угловая частота.

Распределение амплитуды поля основной моды в поперечном направлении описывается следующим уравнением:

, (3.3.2)

где (*ω*)- диэлектрическая проницаемость среды.

В отсутствие в волокне нелинейных явлений рассчитать изменение формы светового импульса в процессе распространения вдоль волокна можно, воспользовавшись преобразованием Фурье.

Рассмотрим распространение спектральных компонент светового сигнала , получаемых преобразованием Фурье огибающей светового импульса :

, (3.3.3)

где - несущая частота.

Спектральные компоненты удовлетворяют уравнению:

, (3.3.4)

где - коэффициент затухания сигнала, =.

Решение этого уравнения известно и характеризует затухание сигнала и сдвиг фаз, пропорциональный пройденному расстоянию:

,(3.3.5)

где Фурье - образ входного светового сигнала имеет вид:

, (3.3.6)

Для однородного волокна выражение упрощается:

 (3.3.7)

Как следует из выражения (3.3.7), в процессе распространения по волокну разные спектральные компоненты приобретают различный фазовый сдвиг, поэтому Фурье - образ выходного сигнала, прошедшего участок однородного ОВ длиной *L*, имеет вид:

. (3.3.8)

Форма выходного сигнала может быть получена из Фурье - образа обратным преобразованием Фурье:

 . (3.3.9)

Искажение световых импульсов при распространения в ОВ можно оценить, разложив постоянную распространения *β*(*ω*) в ряд Тейлора около несущей частоты :

, (3.3.10)

где:

 (3.3.11)

Выражение (3.3.10), ограниченное первыми четырьмя членами разложения, имеет вид:

. (3.3.12)

Если в разложении (3.3.12) пренебречь степенями выше первой, что соответствует распространению светового импульса по ОВ без искажений, то после подстановки (3.3.12) в (3.3.8), (3.3.9) получается:

 . (3.3.13)

Сделав замену переменных , получим . Т.е. в рассмотренном приближении световой импульс затухает, форма его не меняется, и на выходе из волокна он оказывается с временной задержкой . Следовательно, групповая скорость распространения светового импульса равна .

Обычно коэффициент при квадрате разности частот не равен нулю, в этом случае световой импульс искажается. Для светового импульса произвольной формы получить аналитическое выражение не удается, но для импульса гауссовой формы () аналитическое выражение для выходного импульса имеет следующий вид:

, (3.3.14)

где - начальная длительность импульса.

Таким образом, гауссовский импульс сохраняют свою форму, но его длительность , увеличивается:

, (3.3.15)

где величина  называется дисперсионной длиной. Выражение (3.3.15) показывает, что при  импульс расширяется. Темп расширения импульса определяется дисперсионной длиной . При определенной длине световода более короткий импульс уширяется больше, т.к. его дисперсионная длина меньше. При *z* = гауссовский импульс уширяется в  раз. Импульс, вначале не имевший частотной модуляции, приобретает ее по мере распространения в ОВ.

Из выражения (3.3.15) следует, что уширение гауссовского импульса, не обладавшего на входе частотной модуляцией, не зависит от знака параметра дисперсии . Поведение изменяется, однако, если импульс на входе имеет некоторую частотную модуляцию. В случае линейной частотной модуляции гауссовского импульса амплитуда огибающей записывается в виде:

, (3.3.16)

где *С* - параметр модуляции. Полуширина спектра (на уровне интенсивности 1/*е* от максимальной) определяется выражением:

, (3.3.17)

что в  раз больше, чем ширина спектра импульса той же длительности, но без частотной модуляции. Квазимонохроматический импульс без частотной модуляции имеет минимальную длительность, достижимую при заданном спектре. Поэтому световые импульсы без частотной модуляции называются спектрально ограниченными.

Форма прошедшего через оптическое волокно светового импульса с линейной частотной модуляцией (чирпом) имеет вид:

.

(3.3.18)

Таким образом, частотно-модулированный (чирпированный) гауссовский импульс сохраняет свою форму при распространении. Длительность импульса  на выходе волокна связана с длительностью на входе соотношением:

. (3.3.19)

Из выражения (3.3.19) следует, что уширение зависит от знаков параметра  и параметра частотной модуляции *С*. Гауссовский импульс монотонно расширяется с увеличением расстояния, если >0.

Природа поляризационных эффектов в одномодовом оптическом волокне

Так как свет представляет собой электромагнитную волну, а ее распространение в любой среде описывается уравнениями Максвелла, распространение света может рассматриваться путем определения развития связанных с ним векторов электрического  и магнитного  полей в пространстве и времени. Здесь *r* обозначает пространственное положение вектора. Более удобно оперировать с преобразованием Фурье этих векторов (см. ф. 3.3.3). Преобразование Фурье для  определяется аналогичным образом.

Поскольку электроны в атоме заряжены отрицательно, а ядро несет положительный заряд, то при действии электрического поля на материал, подобный кварцу, происходит поляризация атомов. Индуцированная поляризация описывается вектором , зависящим от особенностей среды и прилагаемого электрического поля и связанным с вектором  и электрической индукцией  выражением:

. (3.4.1)

Связь  и  в оптическом волокне определяется свойствами среды и является причиной важного явления – дисперсии.

Рассмотрим поведение фундаментальной моды, представив электрическое поле  световой волны в виде:

, (3.4.2)

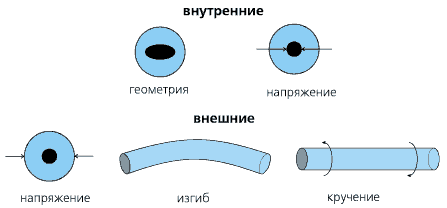
где ,  и  - соответственно единичные векторы, причем *z* – направление распространения света. Данное уравнение имеет два линейно независимых решения, которые соответствуют фундаментальной моде.

Изменяющееся со временем электрическое поле считается линейно поляризованным, если его направление остается постоянным (не зависит от времени). Если электрическое поле, ассоциируемое с электромагнитной волной, не имеет продольной компоненты, поле считается поперечным, в противном случае – продольным. Учитывая это, два линейно независимых решения волнового уравнения представляют линейно поляризованные вдоль осей *x* и *y* электрические поля, которые в силу взаимной перпендикулярности называются ортогонально поляризованными составляющими электрического поля или состояниями поляризации SOP (State of Polarization). Любая линейная комбинация этих двух линейно поляризованных составляющих также является решением уравнения и, таким образом, фундаментальной модой. В идеальном изотропном оптическом волокне оба состояния поляризации имеют одну и ту же постоянную распространения, т.е. распространяются с одинаковой скоростью, и в результате прохождения такой среды длительность результирующего импульса остается неизменной. Но в реальных оптических волокнах из-за нарушения круговой симметрии возникает небольшая анизотропия, поэтому, учитывая, что световая энергия распределена между SOP, различие констант распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе ОВ.

Анизотропия или двулучепреломление оптического волокна может быть связано либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевины, либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале ОВ как это показано на рис. 3.4а, или из-за несовпадения геометрических центров сердцевины и оболочки.

Потеря круговой симметрии приводит к появлению анизотропии, при этом, в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

Рис. 3.4а. Причины возникновения анизотропии оптического волокна.



Скорости распространения поляризационных компонентов светового импульса различны, что приводит к возникновению временной задержки , которую принято называть дифференциальной групповой задержкой DGD (Differential Group Delay), приводящей к уширению результирующего сигнала. Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации PSP (Principal State of Polarization). Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются «быстрой» и «медленной» осями анизотропной среды. Различие скоростей приводит к отставанию импульса, поляризованного вдоль медленной оси PSP (см. рис. 3.4б) от импульса, поляризованного вдоль быстрой оси PSP на величину относительной задержки .

Возникновение DGD вызывает ряд искажений информационного сигнала, включая увеличение длительности импульса. Но в отличие от хроматической дисперсии, PMD не является стабильной, а имеет статистическую природу. Существует несколько факторов роста анизотропии профиля волокна:

статические факторы:

* собственно несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
* скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
* изгибы ВОК и как следствие механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля;

и динамические факторы:

* вариации температуры окружающей среды – для ВОК, проложенных в грунт;
* динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

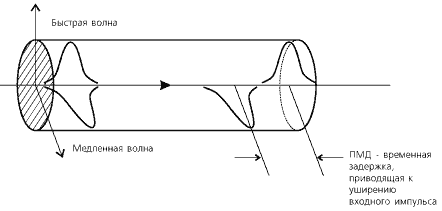


Рис. 3.4б. Появление PMD при распространении световых импульсов в оптическом волокне.

Из-за наличия динамических факторов даже в пределах отдельного сегмента волокна невозможно определить направление поляризации сигнала после прохождения этого сегмента. Тем более, невозможно определить пропорцию, в которой распределиться энергия между PSP на следующем участке волокна. Итак, дифференциальная групповая задержка  не постоянная величина, а изменяется со временем, причем случайным образом. Детальный анализ динамического поведения DGD показывает, что эта случайная величина наилучшим образом подпадает под распределение Максвелла, а среднеквадратичное отклонение  связано со средним значением дифференциальной групповой задержки соотношением:

, (3.4.3)

где индекс Max – обозначает усреднение по функции распределения Максвелла.

Поляризационной модовой дисперсией PMD называют среднеквадратичное значение дифференциальной групповой задержки:

. (3.4.4)

Она обычно измеряется в пс.

В линии с большим числом сегментов значение PMD определяется в зависимости от суммарного расстояния по формуле:

, (3.4.5)

где *L* - протяженность оптической линии связи (км),  - коэффициент PMD оптического волокна (пс/км1/2).

Значение коэффициента  для типичных ОВ находится в пределах от 0,1 до 2 пс/км1/2. В табл. 3.4. для них при разных скоростях цифровой передачи приведены значения максимальной протяженности линии связи.

Таблица 3.4. Значения максимальной протяженности волоконно-оптической линии связи.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | DPMD (пс/км1/2) | 0,1 | 0,5 | 2,0 |
| B=2,5Гбит/с | L (км) | 160 000 | 6 400 | 400 |
| B=10Гбит/с | L (км) | 10 000 | 400 | 25 |
| B=40Гбит/с | L (км) | 625 | 25 | 1,56 |

Задержка световой волны, поляризованной вдоль медленной оси, относительно волны, поляризованной вдоль быстрой оси, приводит к появлению разности фаз  между двумя поляризационными компонентами, прямо пропорциональной DGD  и угловой частоте  световой волны:

. (3.4.6)

Линейная зависимость разности фаз двух поляризационных компонент приводит к периодической зависимости поляризации выходного излучения от частоты.

Контроль PMD в процессе эксплуатации ВОСП.

После прокладки кабеля многие параметры, в том числе и PMD, могут по ряду причин (деформации волокна, температурные изменения, натяжение и т.д.) испытывать отклонения от паспортных данных. Это требует проведения измерений PMD оптических волокон после инсталляции волоконно-оптической кабельной системы. Также в процессе эксплуатации следует проводить регулярные проверки параметра PMD. Для сложных линий с большим числом последовательных сегментов волоконно-оптических кабелей следует проводить тестирование PMD и отдельных сегментов. Если линия состоит из *N* сегментов ВОК, дисперсия в каждом из которых равна , то результирующая поляризационная модовая дисперсия определяется из выражения в соответствии с законом суммы независимых случайных величин:

Заключение

Итак, в представленной курсовой работе автором были исследованы основные принципы цифровой системы передачи, основы теории волоконно-оптических линий связи, параметры оптического волокна и его конструкция. Конструкция волоконно-оптического кабеля, его технические характеристики, а также процессы, происходящие при распространении света в оптическом волокне.

Список использованных источников информации

* 1. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.,1997.
  2. Наний О.Е. Основы цифровых волоконно опических систем связи. Lightwave Russian Edition, № 1, 2003, с. 48–52.
  3. Наний О.Е. Оптические передатчики. Lightwave Russian Edition, № 2, 2003, с. 48–51.
  4. Winzer P. J. and Essiambre R.J. Advanced optical modulation formats. ECOCIOOC 2003 Proceedings, Vol.4, pp. 1002–1003, Rimini, 2003.
  5. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA. Lightwave Russian Edition, № 1, 2003, с. 22–28.
  6. Jacobs I. Optical fiber communication tech nology and system overview, in Fiber Optics Handbook, McGrawHill Companies Inc., 2002.
  7. Agraval G.P. Fiberoptic communication sys tems, Second edition, John Wiley&Sons Inc., 1997.
  8. Волоконная оптика, сборник статей, М., ВиКо, 2002.
  9. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник. Под ред. Гроднева И.И. М.: Р и С, 1993.
  10. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. Изд. “Сайрус системс”, М.: 1999.
  11. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. Изд. “Эко - Трендз”, М.:1999.
  12. Стерлинг Д.Д., мл. Техническое руководство по волоконной оптике. М.: ЛОРИ. 1998.
  13. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы. Под ред. Дмитриева С.А. Изд. “Коннект“, М.: 2000.
  14. Рекомендации ITU-T Rec. G.707.
  15. http://kunegin.narod.ru.
  16. http://optictelecom.ru.

ПРИЛОЖЕНИЕ Список принятых сокращений

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи

BOК – волоконно-оптический кабель

ОК – оптический кабель

ОВ – оптическое волокно

SDH – (Synchronous Digital Hierarchy) синхронная цифровая иерархия

DWDM – (Dense Wavelength Division Multiplexing) сверхплотное волновое мультиплексирование по длине волны

ЦСП – цифровая система передачи

STM-4 – (Synchronous Transport Module) синхронный транспортный модуль уровня 4, соответствующий скорости передачи информации 622,08 Мбит/с

STM-64 – (Synchronous Transport Module) синхронный транспортный модуль уровня 64, соответствующий скорости передачи информации 9953,28 Мбит/с

TDM – (Time Division Multiplexing) временное мультиплексирование информационных потоков

SOP – (State of Polarization) ортогонально поляризованные составляющие электрического поля или состояния поляризации

DGD – (Differential Group Delay) дифференциальная групповая задержка

PSP – (Principal State of Polarization) состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации

PMD – (Polarization Mode) поляризационная модовая дисперсия

DCF – (Dispersion Compesating Fiber) компенсирующее дисперсию волокно

FBG – (Fiber Bragg Grating) волоконная брэгговская решетка - оптический элемент, основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевины или оболочки оптического волокна

1. Наний О.Е. Основы цифровых волоконно - оптических систем связи. Lightwave Russian Edition, № 1, 2003, с. 48–52. Доступные в настоящее время скорости передачи коммерческих беспроводных оптических систем составляют от 2 до 622 Мбит/с с применением всех распространенных интерфейсов локальных вычислительных сетей и цифровых сетей передачи данных. Опытные установки доказали возможность передачи данных с уплотнением по длине волны со скоростью 10 Гбит/с. [↑](#footnote-ref-1)
2. Наний О.Е. Оптические передатчики. Lightwave Russian Edition, № 2, 2003, с. 48–51. [↑](#footnote-ref-2)
3. Системы  электросвязи. Учебник для вузов / В.П. Шувалов, Г.П. Катунин,Б.И.  Крук  и др. Под ред. В.П. Шувалова. - М.: Радио и связь, 1987. - с. - с. 31 [↑](#footnote-ref-3)
4. 5. Jacobs I. Optical fiber communication tech nology and system overview, in Fiber Optics Handbook, McGrawHill Companies Inc., 2002; Agraval G.P. Fiberoptic communication sys tems, Second edition, John Wiley&Sons Inc., 1997; Волоконная оптика, сборник статей, М., ВиКо, 2002. [↑](#footnote-ref-4)
5. Системы  электросвязи. Учебник для вузов / В.П. Шувалов, Г.П. Катунин,Б.И.  Крук  и др. Под ред. В.П. Шувалова. - М.: Радио и связь, 1987. -с.30 [↑](#footnote-ref-5)