

Раздел 2. КАБЕЛЬНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (33 слайда)

Слайд 3

2.1. Кабельные линии связи

Первые телекоммуникационные системы, к которым относятся телеграфные и телефонные системы связи, строились на основе кабельных линий связи.

Кабельная линия связи состоит из кабеля, кабельной арматуры и кабельных сооружений, таких как туннели, колодцы, распределительные шкафы, кабельные столбы.

Кабель представляет собой совокупность гибких изолированных проводников, заключенных в защитную (обычно герметичную) оболочку.

Кабель связи предназначен для передачи данных электрическими или оптическими сигналами.

В зависимости от вида передаваемых сигналов кабели делятся на две группы **электрические кабели**, используемые для передачи электрических сигналов, и **волоконно-оптические кабели**, используемые для передачи светового потока. Соответственно, кабельные линии связи делятся на электрические (ЭЛС) и волоконно-оптические (ВОЛС).

Электрический кабель, предназначенный для передачи электрических сигналов, называется **кабелем связи** в отличие от **силового кабеля**, используемого для передачи на расстояние электрической энергии.

Следует отметить, что по силовым кабелям могут передаваться информационные сигналы.

В качестве электрических кабелей связи в современных телекоммуникационных системах используются витая пара (неэкранированные и экранированные) и коаксиальный кабель (тонкий и толстый).

Слайд 4

2.2. Электрические кабельные линии связи

Электрические кабели

Витая пара (*Twisted Pair*) представляет собой изолированные электрические проводники, попарно скрученные между собой минимально необходимое число раз на определенном отрезке длины, и заключённые в изолирующую оболочку. Скручивание проводников применяется с целью **уменьшения излучения и повышения помехозащищенности** кабеля.

Для снижения взаимного влияния отдельных пар одного и того же кабеля провода пары могут быть скручены с различным шагом.

Витая пара была изобретена в 1881 году Александром Беллом, изобретателем телефонии, и до настоящего времени широко используется в телефонии.

Несколько витых пар (обычно 4, 8 и более), заключённые в общую защитную пластиковую оболочку, образуют **кабель**.

Неэкранированная витая пара содержит одну или несколько пар скрученных изолированных проводников, заключенных в пластиковую оболочку.

Экранированная витая пара имеет экранирующую металлическую оплетку, за счёт чего уменьшается излучение и лучше обеспечивается защита от электромагнитных помех по сравнению с неэкранированной витой парой. В случае нескольких витых пар экранирование может быть выполнено как общее для всех пар, так и для каждой витой пары.

Международный стандарт ISO/IEC 11801 (опубликован в 1995 г., обновленная редакция – в 2010 г.), описывающий телекоммуникационные кабельные системы общего назначения, ввел обозначения типа экранированного кабеля в виде:

x/yTP,

где **x** – тип общего экрана, **y** - тип экрана для отдельных пар и **TP** – Twisted Pair.

Типы экранов **x** и **y** могут принимать одно из трех значений:

U (Unshielded) – неэкранированный,

S (Shielded Twisted Pair – STP) – металлическая оплётка (*только общий экран*),

F (Foiled Twisted Pair – FTP) – металлизированная лента (алюминиевая фольга).

В соответствии с этими обозначениями существуют следующие типы экранированной витой пары:

1. *Индивидуальный экран* (U/FTP) - экранирование алюминиевой фольгой каждой пары для защиты от внешних помех и от перекрёстных помех между витыми парами.

2. *Общий экран* (F/UTP, S/UTP, SF/UTP) – общий экран из фольги, оплётки или фольги с оплёткой, защищающий от внешних электромагнитных помех.

3. *Индивидуальный и общий экран* (F/FTP, S/FTP, SF/FTP) – индивидуальные экраны из фольги для каждой витой пары, плюс общий экран из фольги, оплётки, или фольги с оплёткой. Защищает от внешних помех и от перекрёстных помех между витыми парами.

Соответственно, неэкранированная витая пара имеет обозначение U/UTP, означающее отсутствие как общего, так и индивидуального экранирования.

В коаксиальном кабеле (от лат. *co* – совместно и *axis* – ось) проводники представляют собой 2 соосных металлических цилиндра, разделенных диэлектриком. Коаксиальный кабель используется для передачи

высокочастотных сигналов (до нескольких ГГц) и характеризуется высокой помехозащищенностью и малым затуханием сигналов. Это обусловлено отсутствием внешнего электромагнитного поля – вся энергия распространяется только внутри кабеля.

Благодаря совпадению осей проводников коаксиального кабеля создаваемые два электромагнитных поля сосредоточены в пространстве между проводниками и, в идеале, не выходят за пределы кабеля. Это исключает потери электромагнитной энергии и защищает передаваемые сигналы от внешних электромагнитных наводок. Весь полезный сигнал передаётся по внутреннему проводнику.

Коаксиальный кабель был изобретён и запатентован в 1880 году британским физиком Оливером Хевисайдом.

Коаксиальный кабель используется для передачи высокочастотного сигнала в различных областях техники, а именно:

- в системах связи;
- в широковещательных (радио, телевидение) и компьютерных сетях;
- в системах сигнализации, контроля и видеонаблюдения;
- в бытовой и любительской технике;
- в военной технике и других областях специального применения.

В середине прошлого века коаксиальный кабель широко использовался для прокладки трансатлантических линий связи.

В общем случае коаксиальный кабель содержит:

- *внутренний проводник* диаметром от 0,4 мм до 2,5 мм;
- *диэлектрик*, в качестве которого обычно применяется обычный полиэтилен или физически вспененный полиэтилен с низкой плотностью, позволяющий уменьшить коэффициент затухания;
- *внешний проводник*, в качестве которого обычно используется фольга;
- *медную оплетку* с покрытием из олова;
- *защитную пленку*;
- *внешнюю оболочку*.

В современных телекоммуникационных системах, включая компьютерные сети, наиболее широкое применение нашли два типа коаксиального кабеля: *толстый (thick)* диаметром около 1 см и *тонкий_(thin)* диаметром около 0,5 см.

Толстый коаксиальный кабель, в отличие от тонкого, прочнее и обеспечивает более надежную защиту от внешних помех.

Тонкий коаксиальный кабель, в отличие от толстого, дешевле, но имеет больший коэффициент затухания.

Слайд 5

Характеристики электрических кабелей связи

Существует несколько *категорий электрического кабеля*, различающиеся значениями электромагнитных характеристик.

К основным электромагнитным характеристикам электрических кабелей относятся:

- коэффициент затухания;
- импеданс;
- перекрестные наводки;
- активное сопротивление;
- емкость.

1. Коэффициент затухания или просто **затухание**, характеризующее степень уменьшения мощности сигнала при передаче по кабелю:

- является одной из основных характеристик, учитываемых при проектировании ЭЛС и определении максимальной длины кабеля между узлами;
- зависит от частоты передаваемого сигнала – увеличивается с ростом частоты;
- измеряется в [дБ/м и дБ/100м].

2. Импеданс или волновое сопротивление – полное сопротивление электрической цепи, складывающееся из активного сопротивления R и реактивного сопротивления X :

- $Z = R + jX$, где j – мнимая единица.
- измеряется в Омах и является относительно постоянной величиной для кабельных систем; при высоких скоростях передачи импеданс зависит от частоты;
- резкие изменения импеданса по длине кабеля могут вызвать процессы внутреннего отражения, приводящие к возникновению стоячих волн, искажающих передаваемый информационный сигнал.

Активное сопротивление создается элементами (резисторами), в которых электрическая энергия преобразуется в другой вид энергии (например, тепловую).

Реактивное сопротивление возникает в элементах (катушка индуктивности и конденсатор), которые создают угол сдвига фаз между током и напряжением .

3. Перекрестные наводки между витыми парами **на ближнем конце (NEXT – Near End Crosstalk)** и **на дальнем конце (FEXT – Far End Crosstalk)** – результат интерференции передаваемых сигналов, в результате которого электромагнитное поле сигнала, передаваемого по одной паре проводников, наводит на другую пару проводников сигнал помехи:

- значения NEXT и FEXT измеряются в децибелах при определённой частоте как логарифм отношения мощности наведенного сигнала $P_{\text{н}}$ к мощности исходного (передаваемого) сигнала P :

$$NEXT (FEXT) = 10 \lg \frac{P_h}{P};$$

- чем *больше абсолютное* значение NEXT (FEXT), тем лучше, так как наводки в соседних проводниках будут меньше;
- значения NEXT и FEXT зависят от частоты передаваемого сигнала, причем с увеличением частоты наводки возрастают;
- FEXT зависит от длины кабеля, причем с увеличением длины кабеля абсолютное значение FEXT увеличивается.

Из рисунка видно, что на ближнем конце проводника (по отношению к передающему узлу) высокий уровень сигнала, передаваемого от узла Y_1 к узлу Y_2 , наводит паразитный сигнал, искажающий информационный (полезный) сигнал во втором проводнике, по которому передаются данные от Y_2 к Y_1 .

На дальнем конце паразитный сигнал во втором проводнике значительно меньше, поскольку в результате затухания меньше уровень информационного сигнала, передаваемого в первом проводнике от Y_1 к Y_2 . С учётом того, что уровень информационного сигнала во втором проводнике на «дальнем конце» имеет максимальное значение, можно сделать вывод, что наведённый паразитный сигнал незначительно искажит информационный сигнал.

Отсюда следует, что NEXT является более важной характеристикой, чем FEXT, так как его значение в большей мере сказывается на качестве передачи сигналов.

4. *Активное сопротивление* – сопротивление электрической цепи переменному току (определяет действительную часть R импеданса):

- не зависит от частоты;
- возрастает с увеличением длины кабеля;
- измеряется в Омах на 100 м.

5. *Ёмкость* – свойство металлических проводников накапливать электрическую энергию:

- является нежелательной величиной и должна быть минимальной;
- высокое значение ёмкости в кабеле приводит к *искажению сигнала* и ограничивает полосу пропускания линии.

Слайд 6

Классификация электрических кабелей связи

Коаксиальные кабели обладают лучшими характеристиками по сравнению с витой парой, что позволяет строить на их основе более протяженные линии связи, чем на витой паре. Естественно также, что экранированная витая пара более эффективна по своим электромагнитным характеристикам, чем неэкранированная. Однако более низкая стоимость

последней делает во многих случаях неэкранированную пару более предпочтительной, особенно для телекоммуникационных систем, охватывающих небольшие по размерам территории.

Существует несколько классов и категорий *неэкранированной витой пары*, представленных в последней редакции международного стандарта ISO 11801 для построения каналов связи. Категории нумеруются, причём чем выше категория кабеля, тем больше его полоса пропускания.

Кабели 1-й и 2-й категорий используются в основном в телефонных сетях и не используются для передачи данных в компьютерных сетях, поскольку не позволяют обеспечить высокую скорость передачи данных.

Для передачи данных в компьютерных сетях Американский национальный институт стандартов разработал стандарт EIA/TIA-568, в котором определены спецификации для 3-й, 4-й и 5-й категорий, нормирующие такие характеристики как:

- коэффициент затухания,
- волновое сопротивление,
- емкость и другие.

Так, например, для кабеля 5-й категории:

- затухание должно составлять не более 23,6 дБ на 100 м при частоте 100 МГц,
- волновое сопротивление – не более 100 Ом \pm 15%;
- NEXT – не менее 27 дБ при частоте 100 МГц;
- активное сопротивление – не более 9,4 Ом на 100 м;
- емкость не более 5,6 нФ на 100 м.

В последней редакции международного стандарта ISO 11801 для построения каналов связи разных классов определены 8 категорий с подкатегориями, представленные в таблице.

Для каждой из восьми категорий определена эффективная полоса пропускания (частотный диапазон). При этом, чем выше категория кабеля, тем больше витков на единицу длины имеет каждая пара и тем больше витых пар содержит кабель.

Здесь же показан кабель категории 6, в котором провода скручены в пары, каждая со своим шагом, а пары дополнительно скручены вокруг общей оси – *разделительного корда*.

Слайд 7

В таблице представлены характеристики распространения сигналов в кабелях разных типов в соответствии со справочными данными IEEE:

- задержка;
- время распространения сигнала;
- скорость распространения сигнала.

Слайд 8

2.3. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) используются для высокоскоростной передачи данных, представляемых в виде *оптических сигналов*, по оптическим диэлектрическим *световодам*, которые являются самой перспективной физической средой для передачи данных.

Оптический сигнал представляет собой модулированный световой поток, генерируемый *светодиодами* или *полупроводниковыми (диодными) лазерами*.

Основными компонентами ВОЛС являются:

- 1) оптическое волокно;
- 2) волоконно-оптический кабель;
- 3) оптические компоненты и устройства;
- 4) электронные компоненты систем оптической связи.

ВОЛС, используемые для передачи данных в телекоммуникационных системах, имеют множество *преимуществ* по сравнению с электрическими линиями связи благодаря ряду присущих им *достоинств*, и, прежде всего, возможность обеспечения *сверхвысоких скоростей передачи*, которая может достигать десятков Тбит/с.

Оптическое волокно изготавливается из стекла, которое, в свою очередь, производится из кварца (песка) – недорогого необработанного материала.

Для изготовления волокон используется материал, имеющий *невысокую стоимость* по сравнению с медью в электрических проводниках. Таким материалом является кварц, представляющий собой песок на пляже, доступный в неограниченных количествах. И если вначале стоимость ВОЛС значительно превышала стоимость ЭЛС из-за технологических проблем изготовления сверхпрозрачного стекла, то в настоящее время, благодаря появлению современных технологий и массовому производству оптических волокон, *стоимости ВОЛС и ЭЛС стали практически соизмеримыми*.

ВОЛС *компактны и легки*, что делает их незаменимыми для использования в авиации, приборостроении и в других областях.

В ВОЛС обеспечивается *гальваническая развязка сегментов*, что *делает их безопасными в электрическом отношении*. По этой же причине они могут монтироваться на мачтах линий электропередач вместе с электрическими силовыми кабелями, поскольку они *устойчивы к электромагнитным помехам*.

Данные, передаваемые по ВОЛС, защищены от несанкционированного доступа, поскольку любая попытка присоединиться к линии передачи невозможна без нарушения целостности оптического кабеля, что легко может

быть обнаружено в процессе постоянного мониторинга ВОЛС. Это же обуславливает возможность применения *скрытой передачи данных*.

Немаловажным фактором является *долговечность* ВОЛС, которая оценивается минимально в 25 лет, что примерно в 2- 2,5 раз больше, чем срок службы ЭЛС.

К недостаткам ВОЛС следует отнести

- 1) необходимость наличия *специальных технических средств*, таких как преобразователи электрических сигналов в оптические и обратно, оптическое оборудование для соединения оптических кабелей, усилители и разветвители оптических сигналов и т.д.;
- 2) для монтажа волокон необходимо *дорогое прецизионное оборудование*;
- 3) *высокие затраты на восстановление* кабеля при его повреждении (обрыве).

Слайд 9

1. Оптическое волокно

Оптическое волокно – главный компонент ВОЛС – состоит из **сердцевины (световодной жилы)** и **оболочки**, изготовленных из оптически прозрачного материала (стекло, пластик), с разными показателями преломления n_1 и n_2 , и имеет защитное **пластиковое покрытие**. Диаметр оболочки составляет 125 мкм, диаметр покрытия – 250 мкм.

Стеклянные оптические волокна делаются из кварцевого стекла, но для инфракрасного диапазона могут использоваться другие материалы, например **фторцирконат**.

В последнее время все более широкое распространение получают **пластиковые оптические волокна**.

Свет по своей природе является **электромагнитной волной**, т.е. имеет электрическую и магнитную составляющие, которые представляются в виде **векторов напряженности** **электрического** и **магнитного** поля соответственно. Разные комбинации этих векторов соответствуют разным типам волн, называемым **модами**. Таким образом, мода – это одна из составляющих света, распространяющегося в оптическом волокне, которая соответствует определенному типу колебаний. В общем случае *каждая мода имеет свою траекторию распространения светового излучения*.

Оптические волокна в зависимости от числа мод, распространяющихся в них, делятся на многомодовые и одномодовые.

В многомодовых волокнах световодная жила имеет диаметр 50–62,5 мкм, что делает возможным распространение в них одновременно нескольких лучей (мод), формируемых светодиодами, как показано на рисунке. **Число мод** в оптическом волокне зависит от диаметра световодной жилы и длины

волны – с увеличением диаметра и уменьшением длины волны число мод возрастает.

В одномодовых волокнах может распространяться только один луч (одна мода). Диаметр световодной жилы составляет 8–10 мкм. Поскольку диаметр одномодового волокна равен нескольким длинам волн света, то волокно начинает действовать подобно волноводу, и свет может двигаться только по прямой линии без отражений от стенок волокна.

При использовании *светодиодов* в качестве источника светового потока в сердцевину одномодового волокна попадает незначительная часть светового потока, что делает передачу светового сигнала на большие расстояния неэффективной.

Применение одномодовых волокон в телекоммуникационных системах стало возможным благодаря появлению *полупроводниковых лазеров*, позволяющих сосредоточить всю энергию светового потока в одном узком пучке света, вводимого в сердцевину одномодового волокна.

Слайд 10

1. Оптическое волокно: длины волн и частоты

На слайде демонстрируется диапазон частот (длин волн), используемый для передачи оптических сигналов по оптоволокну, который располагается в несколько более низкочастотной области по отношению к области видимого спектра и занимает частоты ниже 350 ТГц. Соответственно диапазон длин волн для передачи оптических сигналов по оптоволокну находится примерно в интервале от 850 до 2500 нанометров, что соответствует диапазону частот 375 ТГц – 120 ТГц.

Слайд 11

1. Оптическое волокно: одно- и многомодовое

В одномодовом волокне диаметр световодной жилы соизмерим с длиной волны передаваемого оптического сигнала и составляет 8-10 мкм. Только один сигнал (одна мода) передается по волокну, что исключает влияние других мод, как в многомодовом волокне.

На качество передачи оптического сигнала, а также на дальность распространения, оказывают влияние такие процессы как:

- преломление;
- отражение;
- рассеяние;
- внутреннее поглощение.

Преломление состоит в изменении угла прохождения луча света через границу двух сред с разными показателями преломления.

Показатель (коэффициент) преломления n оптического волокна показывает во сколько раз скорость v_n распространения света в среде (в данном случае в оптическом волокне) меньше скорости распространения света в вакууме C :

$$n = \frac{C}{v_n}.$$

Среда с более высоким значением коэффициента преломления является более *плотной оптической средой*. В оптическом волокне такой средой является *сердцевина*, в которой распространяется свет.

Коэффициент преломления сердцевины оптического волокна n_1 обычно немного больше коэффициента преломления оболочки n_2 и составляет примерно 1,46, однако его тысячные доли могут отличаться у разных волокон и разных производителей.

Если угол падения светового луча α_1 больше **критического значения** α_0 ($\alpha_1 > \alpha_0$), определяемого через *числовую апертуру оптоволокна*, то луч преломляется и выходит из сердцевины.

Отражением называется изменение направления светового луча на границе между двумя средами, при котором луч остается в той же самой среде, т.е. отражается и остается в сердцевине. Это происходит в том случае, если угол падения луча α_2 меньше критического значения α_0 .

Если угол отраженного луча α_3 равен углу падения α_2 , имеем **полное внутреннее отражение**, т.е. луч отражается практически без потерь и может быть передан на значительное расстояние.

Поскольку лучи входят в оптоволокно под разными углами, они отражаются от границы раздела сердцевины и оболочки под разными углами и проходят разное расстояние до пункта назначения.

Рассеяние может быть охарактеризовано как процесс, при котором распространяющийся световой пучок отклоняется по разным направлениям из-за наличия оптических неоднородностей среды передачи. В прозрачной однородной среде световой пучок распространяется только в одном направлении, не подвергаясь рассеянию. Другими словами, *чем прозрачнее среда передачи светового излучения, т.е. чем меньше неоднородностей, тем меньшее рассеяние*.

Внутреннее поглощение приводит к уменьшению мощности сигнала (затуханию) и зависит от чистоты материала сердцевины.

Одномодовые волокна применяются в протяженных высокоскоростных магистральных линиях связи длиной до 10000 км, в городских линиях связи и в сетях доступа.

Основное преимущество одномодовых волокон перед многомодовыми заключается в отсутствии межмодовой дисперсии, вызванной различием скоростей распространения разных мод. Межмодовая дисперсия приводит к уширению импульсов, что существенно ограничивает скорость и дальность передачи информации. При распространении сигнала в многомодовом волокне искажается поперечная структура светового сигнала и появляются избыточные шумы. По этой причине многомодовые волокна применяются только в коротких линиях связи с максимальной длиной несколько десятков километров.

Слайд 12

1. Оптическое волокно: числовая апертура

Числовая апертура оптического волокна – это синус максимального угла падения α_0 светового луча по отношению к оси волокна, при котором свет входит в сердцевину и далее распространяется по волокну. Числовая апертура определяется как квадратный корень из разницы квадратов показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где α_0 - **максимальный угол ввода** светового луча по отношению к оси волокна, при котором свет входит в сердцевину и далее распространяется в сердцевине оптоволокна.

В зависимости от соотношения угла ввода α светового луча и максимального угла падения α_0 световой луч подвергается *преломлению*, если $\alpha > \alpha_0$, или *отражается* от оболочки, если $\alpha < \alpha_0$.

Числовая апертура для одномодовых оптических волокон, применяемых в системах телекоммуникаций, составляет около 0,1 для одномодового волокна и 0,3 для многомодового волокна, что приблизительно соответствует углам ввода светового луча в оптоволокно от 2° до 9° для одномодового волокна и от 17° до 19,5° для многомодового волокна соответственно.

Слайд 13

1. Оптическое волокно: многомодовое

В многомодовом волокне, имеющем существенно больший диаметр световодной жилы (сердцевины), передается несколько световых потоков (мод).

Многомодовые волокна подразделяются на **ступенчатые** и **градиентные**.

В *ступенчатых волокнах* показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно и имеет одинаковое значение по всей

сердцевине. Это приводит к резкому изменению траектории (преломлению) светового луча в волноводе при попадании на границу с оболочкой.

В градиентных волокнах показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. Это приводит к явлению **рефракции** в сердцевине (траектория светового луча изменяется плавно), благодаря чему оптический импульс искажается незначительно, и вся энергия светового луча сохраняется в сердцевине.

Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим (как показано на слайде), треугольным, ломанным и т.п.

Расчет числовой апертуры в случае градиентного многомодового волокна с непрямоугольным профилем показателя преломления сердцевины сопровождается более сложными расчетами числовой апертуры, которая, например, может быть определена на основе эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления с учетом показателя преломления сердцевины.

Слайд 14

1. Оптическое волокно: свойства

На слайде демонстрируются 3 варианта ввода светового луча в сердцевину многомодового оптоволокна под разными углами ввода, приводящие к разным эффектам распространения светового луча в оптоволокне.

В первом варианте угол ввода α_1 светового луча в сердцевину достаточно большой и световой луч, попадая на границу с оболочкой, преломляется и большая часть его энергии покидает сердцевину и уходит в оболочку.

Во втором варианте угол ввода светового луча в сердцевину уменьшен до такого значения α_2 ($\alpha_2 < \alpha_1$), при котором световой луч, преломляясь на границе с оболочкой, не покидает сердцевину и распространяется вдоль границы. Можно показать, что в этом случае угол ввода α_2 равен углу апертуры α_0 , который представляет собой *критический угол ввода*.

Если угол ввода меньше угла апертуры, получим полное внутреннее отражение светового луча от оболочки, причем угол отражения равен углу падения.

Слайд 15

1. Оптическое волокно: преломление

В многомодовом оптическом волокне происходит передача только тех оптических сигналов, которые попадают в сердцевину волокна в пределах определенного диапазона углов, образующих *приемный конус* или конус ввода волокна. Половина угла этого конуса называется **углом приема** α_0 , который определяет максимальный угол ввода светового луча, при котором он будет

распространяться внутри сердцевины. Луч, вводимый в сердцевину оптоволокна под углом, меньшим чем α_0 , в процессе движения многократно отражается от оболочки оптоволокна. Угол, равный $2\alpha_0$ образует так называемый приемный конус или допустимый конус ввода светового луча.

Если угол ввода луча $\alpha_b > \alpha_0$, световой луч, попадая на границу с оболочкой, подвергается преломлению и далее распространяется в оболочке, покидая сердцевину. При этом угол θ_1 , образуемый между световым лучом в сердцевине и нормалью по отношению к границе, разделяющей две среды – сердцевину и оболочку, меньше аналогичного угла θ_2 в оболочке: $\theta_1 < \theta_2$.

При преломлении света на границе двух прозрачных сред с разными коэффициентами преломления n_1 и n_2 , числовая апертура, в соответствии с **законом Снеллиуса**, остается неизменной, что выражается в виде следующего соотношения:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

С учетом того, что скорость распространения светового луча и коэффициент преломления связаны обратно пропорциональной зависимостью: $n = \frac{c}{v_n}$, предыдущее соотношение может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}.$$

Из условия $n_1 \sin \theta_1 = n_1$ можно определить минимальный угол ввода светового луча θ_1 , называемый **критическим углом падения (ввода светового луча)**, при котором это луч остается в сердцевине ($\theta_2=90^\circ$):

$$\theta_1^* = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Для того чтобы световой луч распространялся в пределах сердцевины за счет отражения на границе сердцевины с оболочкой, необходимо, чтобы угол ввода луча был больше критического угла падения: $\theta_1 > \theta_1^*$.

Слайд 16

1. Оптическое волокно: формулы

На слайде иллюстрируется вывод формулы для расчета числовой апертуры на основе закона Снеллиуса.

Слайд 17

1. Оптическое волокно: отражение

На слайде иллюстрируется эффект полного внутреннего отражения светового луча, вся энергия которого остается в сердцевине оптоволокна.

Слайд 18

1. Оптическое волокно: 3 моды

На слайде иллюстрируется процесс передачи трех световых лучей (мод), введенных в сердцевину оптоволокна под разными углами в пределах приемного конуса ввода.

Слайд 19

1. Оптическое волокно: характеристики

Важнейшими характеристиками оптического волокна являются: затухание и дисперсия.

Затухание определяется потерями на поглощение и рассеяние излучения в оптическом волокне и измеряется в децибелах на километр (дБ/км). Потери на поглощение зависят от чистоты материала, а потери на рассеяние – от неоднородностей его показателя преломления.

Затухание зависит и от длины волны излучения, вводимого в волокно.

Диапазон длин волн оптического излучения, в котором затухание светового сигнала меньше, по сравнению с другими диапазонами (достигает минимума), называется **окном прозрачности**.

Стандартное ступенчатое оптическое волокно имеет три окна прозрачности: 0,85 мкм, 1,31 мкм и 1,55 мкм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность, что иллюстрируется на графике и в таблице, показывающих зависимость затухания, измеренного в дБ/км, от длины волны, заданной в микрометрах.

Первые системы волоконно-оптической связи (в 70-х годах прошлого века) использовали **первое окно прозрачности** с длиной волны 0,85 мкм. В настоящее время из-за большого затухания этот диапазон используется только в офисных оптических сетях.

Использование **второго окна прозрачности** в 80-х годах стало возможным благодаря появлению лазеров для дальней связи, работающих на длине волны 1,31 мкм. Второе окно прозрачности с длиной волны 1,31 мкм, имеющее меньшее затухание по сравнению с первым, используется при построении городских и региональных сетей небольшой протяжённости.

В начале 90-х годов было освоено **третье окно прозрачности** с длиной волны 1,55 мкм, характеризующееся наименьшим затуханием светового сигнала, составляющим около 0,2 дБ/км, что позволяет строить линии связи длиной до нескольких десятков километров без регенерации сигналов. Кроме того, появилась возможность реализации спектрального уплотнения (WDM).

В дальнейшем были разработаны еще несколько окон прозрачности, а также оптические волокна, имеющие сравнительно хорошую прозрачность в инфракрасном диапазоне.

Так, **четвёртое окно прозрачности** с длиной волны 1,58 мкм позволило увеличить рабочий диапазон WDM.

Пятое окно прозрачности появилось в результате тщательной очистки оптического волокна от посторонних примесей, что позволило создать оптоволокно с малыми потерями в области от 1,28 мкм до 1,65 мкм

В связи с увеличением рабочего диапазона оптических волокон Международный союз электросвязи утвердил 6 спектральных диапазонов O, E, S, C, L и U в интервале 1260...1675 нм.

Ведутся разработки еще более "прозрачных", так называемых, *фтороцирконатных волокон* с затуханием порядка 0,02 дБ/км при длине волны 2,5 мкм, на основе которых могут быть созданы линии связи, обеспечивающие гигабитные скорости передачи и с регенерационными участками через каждые 4-5 тысяч километров.

Дисперсия или световая дисперсия – рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала.

Поскольку при передаче информации светодиод или лазер излучает некоторый спектр длин волн, дисперсия приводит к *уширению импульсов* при распространении по волокну и тем самым порождает искажения сигналов.

Величина уширения зависит от длины волны. Чтобы не допустить перекрывания соседних расширяющихся импульсов, можно увеличить расстояние между ними, т.е. уменьшить скорость передачи. Эффект дисперсии можно уменьшить, если придавать световым импульсам специальную форму. Такие импульсы называются *уединенными волнами (солитонами)* и могут быть переданы на тысячи километров без искажения формы.

При оценке дисперсии используют понятие "**полоса пропускания**" – величина, обратная величине уширения импульса Δt при прохождении им по оптическому волокну расстояния в 1 км: $\Pi = \frac{1}{\Delta t}$. Измеряется полоса пропускания в мегагерцах на километр (МГц*км).

Из определения полосы пропускания следует, что дисперсия налагает ограничения на дальность передачи и верхнее значение частоты передаваемых сигналов. Если полоса пропускания оптического волокна составляет 1000 МГц*км (что соответствует величине уширения импульса в 1 нс/км), то пропускная способность линии связи длиной в 1 км будет не более 1 Гбит/с, а при длине линии связи в 10 км – не более 100 Мбит/с.

Значения дисперсии и затухания различны для разных типов волокон.

В настоящее время максимальная ширина полосы пропускания многомодового волокна составляет 28 000 МГц*км для волокна ОМ5, а полоса пропускания одномодового волокна теоретически не ограничена.

Для обеспечения высокой скорости передачи на большие расстояния, необходимо свести к минимуму потери и дисперсию, причем на одной и той же длине волны.

Для длины волны 1,31 мкм второго окна прозрачности характерна нулевая дисперсия, что существенно уменьшает искажение оптических импульсов.

Слайд 20

2. Волоконно-оптический кабель (ВОК)

Волоконно-оптический кабель (ВОК) – среда передачи данных, состоящая из оптических волокон (стеклянных или пластиковых), заключенных в защитную герметичную оболочку.

Современный кабель в общем случае, как показано на рисунке, может включать в себя, кроме оптических волокон, медные жилы для передачи электрических сигналов, медную фольгу в качестве экрана, а также изолирующую и защитную оболочки.

ВОК может содержать одномодовые и многомодовые волокна, характеристики которых для сравнения представлены в таблице.

Как следует из таблицы, ВОК с одномодовыми волокнами имеют лучшие значения таких характеристик как затухание и полоса пропускания, так как в них распространяется только один луч, а расстояние между узлами, на которое могут быть переданы оптические сигналы без регенерации, может достигать 50 км.

Основным недостаткам ВОК с одномодовыми волокнами является более высокая стоимость, связанная с высокой стоимостью одномодовых источников излучения, обусловленной сложностью ввода светового луча из-за малого диаметра световодной жилы, и дороговизной монтажа оптических разъемов на концах одномодовых кабелей. Кроме того, трудно минимизировать потери сигнала при спlicingе одномодовых волокон.

В то же время ВОК с многомодовыми волокнами дешевле, они более удобны при монтаже, так как в них гораздо проще ввести световой луч, поскольку диаметр световодной жилы значительно больше, чем у одномодового волокна, проще снабдить оптическими разъемами с малыми потерями, а также меньше потери мощности оптического сигнала при спlicingе волокон.

К недостаткам ВОК с многомодовыми волокнами относятся:

- *большое затухание*, составляющее при длине волны 0,85 мкм – 3-4 дБ/км;
- передача данных без применения промежуточных повторителей ограничена *расстоянием не более 2-х км*;
- *полоса пропускания* многомодовых волокон, которая составляет порядка 1000 МГц*км, *недостаточна* для магистральных линий связи, но вполне приемлемая для локальных сетей, где ВОК с многомодовыми волокнами и находят применение.

В качестве **преимуществ ВОК** по сравнению с электрическими кабелями следует отметить:

- высокую пропускную способность, превышающую возможности электрических кабелей в десятки и сотни раз;
- отсутствие электромагнитного излучения, что исключает утечку информации и существенно усложняет ее перехват;
- помехоустойчивость от электромагнитных помех и излучений;
- большое расстояние передачи без повторителей (не менее 2 км);
- существенно меньший вес, что особенно важно для авиации и космических объектов;
- высокое электрическое сопротивление, обеспечивающее гальваническую развязку соединяемых устройств;
- умеренная стоимость, сегодня незначительно превышающая стоимость медного кабеля.

Основными **недостатками** ВОК являются:

- трудоемкость монтажа, требующая специального дорогостоящего оборудования;
- высокая стоимость сетевых устройств, обусловленная необходимостью преобразования оптических сигналов в электрические и обратно.

Слайд 21

3. Оптические компоненты

Третья составляющая ВОЛС – оптические компоненты, к которым относятся:

- Многополюсные устройства, к которым относятся *оптические разветвители* (сплиттеры) и *оптические ответвители*:
- Оптические соединители (коннекторы)
- Системы спектрального уплотнения
- Оптические шнуры (патч-корды)
- Патч-панели
- Кроссовые шкафы и стойки
- Соединительные муфты
- Аттенюаторы (для снижения уровня оптического сигнала)

- Оптические усилители
и др.

Слайд 22

Оптические компоненты

Оптические разветвители (сплиттеры) представляют собой многополюсные устройства, в которых подаваемый на вход, называемый полюсом, оптический сигнал разветвляется по нескольким выходным полюсам. Под *оптическим полюсом* понимается место ввода или вывода оптического излучения. Сплиттеры служат для пассивного разделения одного или нескольких входных сигналов на несколько выходных или объединения нескольких оптических сигналов в один.

В зависимости от направления передачи оптического сигнала сплиттеры делятся на:

- направленные (оптический сигнал передается только в одном направлении);
- ненаправленные (оптический сигнал может передаваться в обоих направлениях).

В зависимости от возможности передачи сигналов с разной длиной волны сплиттеры можно разделить на:

- чувствительные к длине волны;
- нечувствительные к длине волны.

По количеству входов все оптические сплиттеры разделяются на:

- **древовидные** (типа Y) с одним входом и несколькими выходами;
- **звездообразные** (типа X) с несколькими входами и несколькими выходами.

Звёздообразный разветвитель обычно имеет одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал приходит на один из входных полюсов и в равной степени распределяется между выходными полюсами. Во избежание путаницы принято обозначать входные полюса латинскими буквами, а выходные полюса - цифрами (рисунок). Звёздообразные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами. Большое распространение получили звёздообразные разветвители 2x2 и 4x4.

Древовидный разветвитель осуществляет разделение входного оптического сигнала по нескольким выходам, или выполняет обратную функцию – объединение нескольких сигналов в один выходной.

Древовидные разветвители бывают двух типов:

- **симметричные**, разделяющие входную мощность оптического сигнала поровну между выходами;

- **несимметричные**, позволяющие разделить оптическую мощность в заданной пропорции.

Обычно древовидные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами, количество которых может находиться в пределах от 2 до 32.

По своей конструкции древовидные разветвители разделяют на две группы:

- **биконические**, в которых излучение передаётся через боковую поверхность;
- **торцевые**, в которых излучение передаётся через торец.

В обеих группах излучение может передаваться либо при непосредственном контакте световодов, как в *биконических разветвителях* (см. рисунок), либо через вспомогательные элементы - зеркала, линзы, смесители.

Из разветвителей торцевого типа наиболее распространены такие, в которых торцы выходных световодов непосредственно состыковываются с торцом входного световода и закрепляются каким-либо механическим способом или склеиваются. Изменяя взаимное положение торцов сердцевины и подбирая их поперечное сечение, можно изменять в широких пределах отношение мощностей в разных направлениях. Вносимые потери составляют 0,3-1,2 дБ. Для их уменьшения торцы стравливают или сошлифовывают.

Древовидный разветвитель, выходная мощность которого распределяется в неравной пропорции между выходными полюсами (рисунок) называется **оптическим ответвителем**. Обычно большая часть мощности оптического излучения остается в магистральном канале, а остальная – равномерно распределяется между выходными полюсами.

Слайд 23

Оптические усилители увеличивают мощность, но не восстанавливают форму оптического сигнала. На вход усилителя обычно поступает сигнал с искажениями, который после усиления выходит из усилителя с теми же плюс добавленными усилителем шумами и искажениями. Примером такого усилителя может служить волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия – EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), который используется наиболее широко в оптических системах. Достоинством эрбьевых усилителей является:

- отсутствие преобразования в электрический сигнал;
- возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн;
- сравнительно низкий уровень шума;

- простота включения в волоконно-оптическую систему.

Слайд 24

Аттенюаторы применяются в оптических системах для уменьшения мощности оптического сигнала. Такая необходимость может возникнуть как при передачи цифрового, так и аналогового сигнала.

При *цифровой передаче* большой уровень способен привести к насыщению приемного оптоэлектронного модуля.

При *передаче аналогового сигнала* чрезмерно высокий уровень приводит к нелинейным искажениям.

Необходимость применения оптических аттенюаторов может возникать в системах волнового мультиплексирования, когда один канал оказывает влияние на другие из-за нелинейных эффектов в световоде. При этом уровни мощности сигналов в разных каналах могут существенно отличаться друг от друга. Причиной этого могут быть различия уровней мощности на выходе передатчика, разные расстояния передачи, а также зависимости параметров оптических компонентов от длины волны.

По принципу действия аттенюаторы бывают *фиксированные*, которые имеют установленное изготовителем значение затухания, величина которого составляет 0, 5, 10, 15 или 20 дБ, и *перестраиваемые*, в которых значения затухания могут быть заданы оператором.

Оптические соединители (коннекторы) предназначены для соединения ВОК с приёмо-передающей аппаратурой, а также соединения отрезков ВОК между собой и с другими компонентами.

К оптическим соединителям предъявляются следующие требования:

- малые вносимые потери;
- устойчивость к различного рода внешним воздействиям;
- надёжность;
- простота конструкции.

Различают неразъёмные и разъёмные соединители.

Разъёмные соединители (коннекторы) допускают многократные соединения/разъединения и имеют в своей конструкции механизм сцепления.

Неразъёмные соединители жёстко фиксируют друг с другом два световода. Они используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъёмное соединение, является сварка специальным сварочным аппаратом электрической дугой или лазерным лучом. Затухание в таком соединении составляет менее 0,2 дБ. Одним из распространённых способов неразъёмного соединения световодов является использование *прецзионных втулок* или *трубок*, выполняемых обычно из стекла. При этом затухание в таком соединении составляет около 0,3 дБ.

Системы спектрального (волнового) уплотнения реализуют мультиплексирование и демультиплексирование оптических сигналов.

При создании магистральных линий связи с большим числом каналов используется спектральное уплотнение оптических сигналов, называемое волновым мультиплексированием (WDM – Wavelength Division Multiplexing)), суть которого состоит в том, что в одном и том же волокне одновременно передаются несколько оптических сигналов на разных длинах волн. Устройства, реализующие волновое уплотнение, называются WDM-мультиплексорами, которые в настоящее время обеспечивают формирование до 32 каналов в одном волокне со скоростями 10 Гбит/с по каждому каналу.

Уплотненное волновое мультиплексирование (DWDM) характеризуется маленькими интервалами $\Delta\lambda$ между каналами (1,6-0,8 или 0,4 нм) и использованием только одного окна прозрачности 1550 нм.

Мультиплексоры DWDM рассчитаны на работу с большим числом каналов - 32 и более.

Оптические шнуры (патч-корды) представляют собой оптический кабель небольшой длины, оба конца которого снабжены соединителями (оптическими разъемами). Применяется для коммутации (объединения) оборудования в пределах одной стойки или помещения.

Патч-панель представляет собой коммутационную панель с определенным числом разъемов и служит в основном для коммутации компонентов оптической системы. Панели бывают:

- фиксированные (с разъемами одного типа);
- наборные (с разъемами различного типа).

В стандартных вариациях патч-панели изготавливаются с 12, 16, 24, 48 и 96 разъемами.

Кроссовые шкафы и распределительные панели предназначены для организации соединения кабелей и телекоммуникационного оборудования.

Соединительные оптические муфты используются для соединения и защиты оптических кабелей. Различают *тупиковые* и *проходные* оптические муфты. Последняя используется для объединения двух кабелей, которые вставляются в муфту симметрично с двух сторон.

Слайд 25

4. Электронные компоненты систем оптической связи

К **электронным компонентам** систем оптической связи относятся:

- оптические регенераторы;

- передатчики со светоизлучающим диодом (светодиоды) и полупроводниковые (диодные) лазеры;
- приемники оптического излучения;
- устройства частотной и фазовой модуляции излучения.

Для передачи сигналов на большие расстояния используются оптические усилители, восстанавливающие амплитуду сигнала. Недостатками таких усилителей являются:

- накопление по нарастающей и всё большее искажение формы сигнала с увеличением расстояния;
- девиация задержки сигналов, что может, в конечном итоге, привести к потере синхронизации.

Поэтому обычно требуется периодическая регенерация для восстановления первоначальной формы и синхронизации сигналов.

Регенерация – восстановление *амплитуды* (усиление), первоначальной *формы* и *синхронизации* сигналов.

В отличие от усилителя, регенератор принимает искаженный цифровой оптический сигнал и преобразует его в почти идеальную копию сигнала, похожую на ту, которая была сформирована предыдущим передатчиком. Этот регенерированный сигнал практически не имеет искажений.

Полная так называемая **3R регенерация** предполагает выполнение трех операций:

- восстановление амплитуды (усиление) сигнала;
- восстановление формы сигнала;
- восстановление синхронизации.

В современных оптических сетях связи регенерация выполняется с использованием опто-электро-оптического (ОЕО) преобразования. Такие оптические регенераторы называются **оптическими повторителями**, которые осуществляют:

- детектирование (демодуляцию) оптических сигналов;
- преобразование их в электрические сигналы;
- полное восстановление сигнала в электрической форме;
- дальнейшую ретрансляцию в виде оптических сигналов.

В общем случае в **состав оптического повторителя** входят:

- приемник оптических сигналов (ПрОС);
- преобразователь оптических сигналов в электрические (ПОЭ);
- электрический регенератор (ЭР);
- преобразователь электрических сигналов в оптические (ПЭО);
- передатчик оптических сигналов (ПОС),

что делает его достаточно сложными и дорогими.

В настоящее время ведутся разработки **полностью оптических регенераторов**, выполняющих операции восстановления параметров сигнала без преобразования в электрический сигнал.

Слайд 26

Передатчики со светоизлучающим диодом (светодиоды) и полупроводниковые (диодные) лазеры

Передатчики со светоизлучающим диодом (светодиоды) и полупроводниковые (диодные) лазеры используются для ввода светового луча в оптическое волокно.

Передатчики оптического излучения должны обеспечивать максимально возможную мощность сигнала, излучаемого в световод, для безошибочного распознавания этого сигнала на приемной стороне при поступлении его из световода в фотоприёмник.

Конструкция таких устройств может быть различной и определяется характеристиками как передатчиков и приёмников оптического сигнала, так и самих световодов.

Одним из наиболее распространенных устройств ввода является **коническое устройство**, включающее:

- источник излучения;
- сферическую линзу;
- оптический конус;
- одномодовое оптоволокно.

Назначение сферической линзы - исключить появление мод высших порядков при больших диаметрах (1–2 мм) торцевой поверхности конуса.

Светодиод – это излучающий полупроводниковый прибор с р-п-переходом, при протекании через который электрического тока в прямом направлении вызывает интенсивное некогерентное излучение.

Светодиоды ввиду небольших размеров представляют собой точечный источник света, электрическая мощность которого варьируется в интервале от 20 до 120 мВт. При КПД в 5 – 25% в виде света излучается 1 – 30 мВт.

Основными характеристиками светодиодов являются:

- мощность излучения;
- диаграмма направленности;
- длина волны излучения;
- спектральная ширина;
- быстродействие;
- срок службы.

Мощность излучения СИД зависит от тока, протекающего через его р-п-переход. Типичное значение выходной мощности (мощности излучения) светодиода 1 – 5 МВт.

Диаграмма направленности показывает зависимость интенсивности излучения от направления.

Чем уже диаграмма направленности, т.е. чем меньше **диаметр выходного пучка** света и **апертура**, тем большая часть световой энергии попадет в волокно, и, следовательно, тем качественнее источник излучения. Диаметр выходного пучка определяет величину его поперечного сечения, а апертура – угол излучения света. Если диаметр выходного пучка или апертура превышают соответствующие характеристики волокна, в которое вводится свет, то часть излучения будет потеряна и не попадает в волокно. На рисунке представлены диаграммы излучения светодиодов.

Длина волны излучения представляет собой длину волны λ_0 , на которой выходная мощность максимальна.

Спектральная ширина. Светодиоды не являются идеально монохроматическими, поскольку излучают свет в некотором диапазоне длин волн, который называется **спектральной шириной источника** и определяется на 50%-м уровне мощности относительно максимального значения, соответствующего центральной длине волны излучения λ_0 .

Например, если источник имеет длину волны излучения $\lambda_0=850$ нм и спектральную ширину $\Delta\lambda=30$ нм, то его выходное излучение занимает диапазон от $\lambda_H=835$ нм до $\lambda_B=865$ нм, а при $\lambda_0=1300$ нм имеет спектральную ширину $\Delta\lambda=90$ нм ($\lambda_H=1255$ нм, $\lambda_B=1345$ нм).

При небольших расстояниях (до нескольких километров) и частотах передачи до 100 МГц спектральная ширина не оказывается на качестве передачи оптических сигналов. Однако для высокоскоростных протяжённых одномодовых оптических линий связи спектральная ширина ограничивает скорость передачи информации.

Быстродействие – число включений и выключений источника светового сигнала за единицу времени – зависит от времени нарастания τ_n и времени спада τ_c оптического сигнала (рисунок) и, в конечном счете, определяет скорость передачи данных.

Для оценки времён нарастания и спада $\tau_{нар}$ и $\tau_{спад}$ сигнала обычно используют уровни 0,1 и 0,9 от амплитуды мощности сигнала.

Полагая, что время нарастания, время спада и ширина оптического импульса равны между собой, можно оценить полосу пропускания по приближенной формуле, из которой следует, что при времени нарастания $\tau_n=1$ нс – ширина полосы пропускания $\Delta f=330$ МГц.

Быстродействие светодиодов, оцениваемое как максимальная частота модуляции f_{max} , может достигать $f_{max}=200$ МГц.

Срок службы. В процессе эксплуатации светодиода его характеристики постепенно ухудшаются – падает мощность излучения, и, в конце концов, он выходит из строя. Это связано с деградацией полупроводникового слоя.

Надёжность светодиода, определяемая средней наработкой на отказ, составляет более 50 тыс. часов (до 8 лет).

Слайд 27

Полупроводниковые (диодные) лазеры

Полупроводниковый лазер преобразует электрическую энергию в энергию светового когерентного излучения.

Впервые использовать полупроводниковые материалы для создания лазеров предложили в 1961 г. советские учёные Н.Г.Басов, Ю.М.Попов и О.Н.Крохин.

К основным *характеристикам* полупроводникового лазера, определяющих возможность использования его в системах связи и передачи информации относятся:

- мощность излучения;
- диаграмма направленности излучения;
- длина волны излучения моды;
- спектральная ширина;
- быстродействие;
- срок службы.

Мощность излучения зависит от тока накачки и от температуры окружающей среды и может достигать 100 мВт.

Диаграмма направленности оптического излучения имеет форму эллиптического конуса.

Длина волны излучения, как и для светодиодов, это длина волны λ_0 , на которой выходная мощность максимальна.

Спектральная ширина (ширина спектра излучения) $\Delta\lambda$ – интервал длин волн, в котором спектральная мощность составляет половину максимальной. Реально полоса пропускания резонатора конечна и спектр излучения диодного лазера составлен из относительно узких линий.

На слайде показана спектральная характеристика – зависимость спектральной мощности $P(\Delta\lambda)$ от длины волны для разных диодных лазеров.

У многомодовых лазеров ширина каждой отдельной моды $\delta\lambda=1-3$ нм, интервал между ними составляет 2–5 нм. У одномодовых лазеров ширина спектральной линии, состоящая из одной моды $\delta\lambda=0,1-0,4$ нм

Главная отличительная черта диодных лазеров по сравнению со светодиодами – спектр излучения более узкий и имеет линейчатую структуру.

Быстродействие. Лазеры имеют время нарастания $\tau_{nap}<1$ нс, в то время как у светодиодов – несколько наносекунд. Максимальная частота модуляции f_{max} , определяющая быстродействие источников излучения, у диодных лазеров достигает нескольких гигагерц, что существенно больше чем у светодиодов, у которых максимальная частота модуляции составляет несколько сотен мегагерц.

Срок службы. Первые диодные лазеры не обладали высокой надёжностью из-за больших токов накачки. В последние годы надёжность диодных лазеров удалось приблизить к светодиодам.

В таблице представлены результаты сравнительного анализа светодиодов и полупроводниковых лазеров.

Слайд 28

Приемники оптического излучения

Приемники оптического излучения предназначены для преобразования модулированного светового потока, поступающего из оптоволокна, в электрический сигнал.

Основным элементом приемника является **фотодетектор**, который преобразует поступающую энергию света в электрическую энергию выходного сигнала.

В настоящее время используется два типа фотодетекторов (фотодиодов):

- PIN-диоды;
- лавинные диоды (APD- Avalanche Photo Diode).

PIN-диод включает область положительных зарядов (positive), область отрицательных зарядов (negative) и разделяющую их нейтральную область (intrinsic).

Лавинный фотодиод или **APD** (Avalanche Photo Diode) при слабом световом потоке, поступающем на вход фотодиода, повышает уровень выходного сигнала фотодиода перед дальнейшей его обработкой и усилением в электронной части фотоприемника.

PIN-диод по сравнению с лавинными диодами обладает следующими особенностями:

- относительно простая структура;
- относительно слабая чувствительность к изменению температуры прибора;
- квантовая эффективность обычно меньше в 3-4 раза (**квантовая эффективность** – это отношение количества образовавшихся на выходе фотоприемника свободных электронов к количеству фотонов на входе фотоприемника);
- узкий динамический диапазон;
- высокая прочность и длительное время эксплуатации;
- небольшая стоимость;
- низкая чувствительность при данном отношении сигнал/шум.

Приемник оптического излучения (оптический приемник) представляет собой чувствительный широкополосный фотодетектор, совмещенный с усилителем электрического сигнала и схемой АРУ (см. рис. на

слайде). Для уверенного детектирования уровень оптического сигнала на входе приемника должен по крайней мере в два раза превышать уровень собственного шума приемника.

Основными характеристиками приемников оптического излучения служат:

- *порог чувствительности* – минимальная мощность поступающего потока излучения для обнаружения приемником сигнала, устанавливаемая в зависимости от уровня шумов в приемнике;
- *коэффициент преобразования*, связывающий мощность потока излучения, поступающего в приемник, с величиной возникающего в приемнике электрического сигнала;
- *постоянная времени*, по истечении которой сигнал на выходе приемника, на вход которого начинает падать постоянный поток излучения, достигает заранее заданной доли от максимального установившегося значения;
- *область спектральной чувствительности* – спектр частот, в котором поступающий поток излучения, превышающий порог чувствительности, формирует в приемнике сигнал.

Лавинные диоды чувствительны к изменению температуры, поэтому обычно в структуру фотодетектора на основе APD включена схема АРУ.

АРУ – автоматическая регулировка усиления (уровня) (англ. Automatic Gain Control, AGC) автоматически поддерживает на определенном постоянном уровне выходной сигнал приемника – по амплитуде или мощности независимо от амплитуды (мощности) входного сигнала.

АРУ применяется для исключения перегрузки выходных сигналов приемника при больших входных сигналах.

Основные параметры систем АРУ:

- *динамический диапазон (дБ)* – разница между минимальным и максимальным значением входного сигнала, при котором выходной сигнал находится в допустимых пределах;
- *время срабатывания АРУ (дБ/с)* – время реакции АРУ на скачок входного сигнала.

Лавинные диоды по сравнению с PIN-диодами обладают следующими особенностями:

- более сложная структура;
- чувствительность прибора зависит от его температуры;
- квантовая эффективность выше в 3 – 4 раза;
- более широкий динамический диапазон;
- высокая прочность и длительное время эксплуатации;
- более высокая стоимость;
- чувствительность выше примерно на 5 – 6 дБ.

Слайд 29

Способы сращивания оптических волокон

При необходимости построения протяженных линий связи, превышающих строительную длину волоконно-оптического кабеля, приходится решать задачу сращивания оптических волокон с применением специальных средств. Это же задача возникает при случайном или злонамеренном нарушении целостности кабеля.

В этих случаях для сращивания оптических волокон используются следующие средства.

1. Специальные сварочные аппараты, обеспечивающие:

- возможность сваривать любые типы волокон в ручном и автоматическом режимах;
- предварительное тестирование волокна;
- оценку качества поверхности волокон перед сваркой;
- установку оптимальных параметров работы;
- измерение потерь в точке их соединения.

При сварке одно- и многомодовых волокон потери составляют всего 0,01 дБ, что является превосходным результатом.

Достоинства:

- высокое качество сварки;
- большая скорость проведения работ, что немаловажно при ликвидации аварий на магистральных линиях связи.

Недостаток: высокая стоимость сварочных аппаратов.

2. Оптические "спlices" (splice), представляющие собой пластиковые устройства небольшого размера (40x7x4 мм), состоящие из крышки и корпуса со специальным желобом, в который с двух сторон вставляются соединяемые волокна, закрепляемые крышкой-замком.

Для уменьшения затухания в точке соприкосновения в середину спlices вводят небольшое количество оптического геля, показатель преломления которого близок показателю преломления сердцевины оптического волокна. Кроме того, торцы волокон должны быть строго перпендикулярны к оси световода и иметь высокую чистоту поверхности, что достигается при использовании прецизионного скальвателя оптического волокна. Всё это и особая конструкция спlices обеспечивают надежное центрирование, герметичное и качественное соединение волокон с потерями на стыке порядка 0,1 дБ.

Достоинства:

- простота и дешевизна способа соединения;
- малое время на соединение двух волокон (около 30 с после соответствующей подготовки волокон);

- удобство при работе в труднодоступном месте, так как монтаж ведется без применения клея и специального оборудования.

В местах сращивания оптических волокон возникают потери энергии, обусловленные:

- 1) внешними факторами:
 - линейное смещение оптических волокон (рис. а);
 - угловое смещение оптических волокон (рис. б);
 - воздушный зазор между сращиваемыми волокнами (рис. в);
- 2) внутренними факторами:
 - эксцентризитет сердцевины (рис. г);
 - эллиптичность сердцевины (рис. д).

Оптическое волокно широко используется при создании как больших (глобальных), так и небольших офисных сетей, охватывающих небольшие территории.

В состав схемы ВОЛС входят:

- приемопередатчик (трансивер), преобразующий электрический сигнал в оптический (Э/О) и обратно (О/Э);
- оптический соединитель (ОС) в местах подключения кабеля к оборудованию телекоммуникационной сети;
- оптический кабель.

Основные преимущества применения ВОЛС:

- возможность построения более протяженных сетей, чем на основе электрического кабеля;
 - малая вероятность искажения информации – не более 10^{-10} благодаря низкому уровню шумов в оптических линиях связи;
 - возможность наращивания сети без замены кабельных коммуникаций.

В качестве **недостатка** применения ВОЛС можно отметить сравнительно высокую стоимость работ по прокладке оптоволоконного кабеля.

Слайд 30

Технология волнового мультиплексирования WDM (спектральное уплотнение)

Технология волнового мультиплексирования WDM, называемое также спектральным уплотнением, может быть реализовано двумя способами, получившими название:

- грубое волновое мультиплексирование;
- уплотнённое волновое мультиплексирование.

Грубое волновое мультиплексирование CWDM (Coarse WDM) предполагает наличие до 16 спектральных каналов (волн) с пропускной

способностью по 2,5 Гбит/с в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм с разносом несущих в 20 нм, расположенных в диапазоне 1270 – 1610 нм. Таким образом, максимальная суммарная пропускная способность оптоволокна равна 40 Гбит/с.

Область применения технологии CWDM – городские сети с расстоянием до 50 км. Достоинством этого вида WDM является низкая сравнительно стоимость оборудования

Уплотнённое волновое мультиплексирование DWDM (Dense WDM) – это 32, 40 или 80 спектральных каналов (пропускная способность каждого канала от 10 до 100 Гбит/с и более) в окне прозрачности 1550 нм с разносом несущих в 1,6 нм и 0,8 нм в диапазоне 1540 – 1560 нм. В этом случае максимальная суммарная пропускная способность оптоволокна может достигать 8 Тбит/с и более.

Область применения DWDM – магистральные сети. Этот вид систем WDM предъявляет более высокие требования к компонентам, чем CWDM.

Главные достоинства систем DWDM по сравнению с CWDM – большое число каналов и высокая пропускная способность, а недостаток – высокая стоимость оборудования.

Слайд 31

Перспективы ВОЛС

В последние годы наряду с когерентными системами связи развивается альтернативное направление – **солитоновые** системы.

Солитон – уединенная волна, которая не затухает и не поглощается средой, а сохраняет свои размеры и форму сколь угодно долго.

Солитон – это световой импульс с необычными свойствами: он сохраняет свою форму и теоретически может распространяться по "идеальному" световоду бесконечно далеко. Длительность импульса составляет примерно 10 пс.

Солитоновые системы, в которых отдельный бит информации кодируется наличием или отсутствием солитона, имеют пропускную способность не менее 5 Гбит/с при расстоянии 10 000 км.

Работы по увеличению пропускной способности оптических сетей ведутся в двух направлениях:

- увеличивается скорость передачи данных на одной длине волны: в коммерческих системах достигнут уровень 40 Гбит/с, а в тестовых – 400 Гбит/с;
- увеличивается число длин волн, передаваемых по одному волокну: 80 длин волн в коммерческих системах и до 1000 в тестовых.

Теоретическая пропускная способность одного волокна составляет около 400 Тбит/с, что соизмеримо с объемом всего Интернет-трафика. С учетом того, что в выпускаемых сегодня кабелях может находиться до 864

волокон, можно говорить о неограниченной полосе пропускания оптических сетей связи.

Кроме того, появляются новые полностью оптические сетевые устройства, обрабатывающие трафик без преобразования оптических сигналов в электрические и обратно.

Слайд 32

Стандарты кабельных систем

Кабельная система представляет собой совокупность:

- кабелей разных типов (неэкранированная витая пара, коаксиальный кабель, волоконно-оптический кабель);
- соединительных розеток;
- кроссовых кабелей;
- распределительных панелей.

Основными причинами сбоев и отказов в работе телекоммуникационных сетей являются отказы кабельной системы – от 50% до 70%.

Для диагностики и сертификации кабельных систем используется специальное оборудование, а именно:

- **сетевые анализаторы** – дорогостоящие измерительные приборы для диагностики и сертификации кабелей и кабельных систем в лабораторных условиях специально обученным персоналом;
- **приборы для сертификации кабельных систем** – более простые и компактные (размером с видеокассету) приборы, чем сетевые анализаторы, выполняющие те же функции, но обеспечивающие меньшую точность;
- **кабельные сканеры** – приборы для определения длины кабеля, электромагнитных характеристик (NEXT, затухание, импеданс), схемы разводки кабеля, уровня электрических шумов;
- **тестеры (мультиметры)** – наиболее простые и недорогие приборы, позволяющие определить только факт обрыва кабеля.

К современным кабельным системам, используемым, в первую очередь, в компьютерных сетях, предъявляются следующие **требования**:

- *интеграция систем связи*, реализующих передачу различных видов данных (компьютерных, речи, видео), с системами контроля и управления;
- *открытость архитектуры* кабельной системы, обеспечивающей монтаж, последующее обслуживание и развитие комплексных,

стыкующихся со всем сертифицированным оборудованием, систем проводки для различных сооружений;

- обеспечение эффективного функционирования и развития развития телекоммуникационных систем разного назначения;
- обеспечение высокой скорости передачи данных – 100 и более Мбит/с.

Для достижения указанных требований была разработана и стандартизована технология построения кабельных систем, получившая название «СКС - структурированная кабельная система».

Первым стандартом, описывающим СКС, является стандарт ANSI/TIA/EIA-568-A, разработанный и утвержденный комитетами American National Standards Institute (ANSI), Telecommunications Industry Association (TIA) и Electronics Industry Association (EIA).

В 1995 году появился стандарт Стандарт ISO 11801.

Слайд 33

Структурированные кабельные системы

СКС — физическая среда для передачи данных в пределах здания или группы зданий.

СКС включает в себя следующие основные элементы:

- главный распределительный пункт (ГРП) и магистральный кабель телекоммуникационной сети,
- распределительный пункт здания (РПЗ) и вертикальный кабель здания,
- распределительный пункт этажа (РПЭ) и горизонтальный кабель этажа,
- телекоммуникационный разъем (ТР) – розетку для подключения терминального оборудования.

Структурированная кабельная система (СКС) представляет собой иерархическую кабельную систему здания или группы зданий, разделенную на структурные подсистемы, основными среди которых являются:

- вертикальная проводка между этажами здания;
- горизонтальная проводка на этажах;
- кроссовые (коммутационные) панели (кросс-панели);
- модульные розетки на рабочих местах.

К основным **особенностям** СКС можно отнести следующее:

- для передачи компьютерных данных, голоса и видеинформации используется единая кабельная система;
- большие капиталовложения (по сравнению с традиционным подходом) оправдываются за счет длительной эксплуатации сети;
- обладают модульностью и возможностью внесения изменений и наращивания кабельной сети;

- допускают одновременное использование нескольких различных сетевых протоколов;
- не зависят от изменений сетевых технологий и смены поставщика оборудования;
- используют стандартные компоненты и материалы и позволяют комбинировать в одной сети кабели разных видов.

К достоинствам структурированного подхода относятся:

- максимальная *гибкость* в размещении соответствующего коммуникационного оборудования;
- возможность внедрения новых приложений и технологий;
- гарантированное соответствие всех ее компонентов международным стандартам;
- возможность подключения различных видов оборудования с помощью универсальных розеток на рабочих местах.

Недостатки структурированного подхода:

- больший срок построения, чем при традиционном подходе;
- дополнительные капитальные затраты на избыточное оборудование (кабели, розетки, кросс-панели), которые, впрочем, быстро окупаются в процессе эксплуатации.