

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

А.В. Сбитнев, К.Н. Матюхин

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ
НАПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**



Москва - 2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра основ радиотехники и защиты информации

А.В. Сбитнев, К.Н. Матюхин

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Утверждено Редакционно-
издательским советом МГТУ ГА
в качестве учебного пособия

Москва-2016

УДК 681.7.068(075.8)

ББК 6Ф0.1

С 23

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Московского государственного технического университета ГА

Рецензенты: канд. техн. наук В.В. Филиппов;
канд. техн. наук, проф. В.И. Петров (МГТУ ГА)

Сбитнев А.В., Матюхин К.Н.

С 23 Волоконно-оптические направляющие системы: учебное пособие.— М.:
МГТУ ГА, 2015. — 78 с., 32 ил.

ISBN 978-5-86311-990-8

В учебном пособии излагаются физические основы теории передачи по волоконно-оптическим линиям связи в соответствии с Государственным общеобразовательным стандартом высшего профессионального образования. Рассматриваются основы передачи электромагнитной энергии по световодам, оптоэлектронные компоненты, основы проектирования волоконно-оптических линий связи, а также особенности их эксплуатации.

Данное учебное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Волоконно-оптические направляющие системы» по Учебному плану специальности 090302 дневной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 25.05.15 г. и методического совета 09.06.15 г.

ББК 6Ф0.1

Доп. св. тем. план 2016 г.
поз. 26

1. Введение. Общие сведения о линиях и направляющих системах связи

1.1. Роль и место направляющих систем в системах связи

Систему передачи, содержащую направляющую систему (НС), логично представить обобщенной схемой (рис. 1.1).

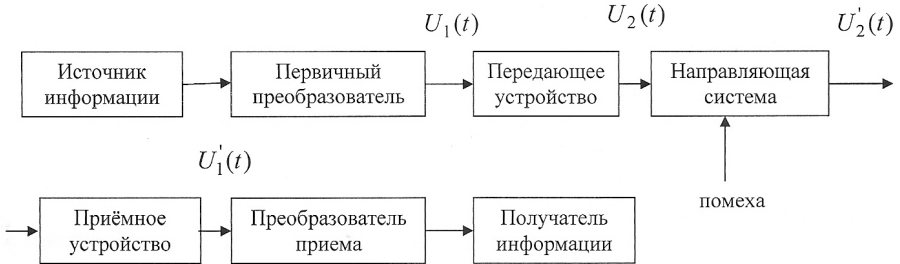


Рис. 1.1. Обобщенная схема системы передачи

На НС действуют помехи, в тракте системы передачи могут возникать различного рода искажения. Поэтому

$$U_1(t) \neq U_1'(t) \text{ и } U_2(t) \neq U_2'(t). \quad (1.1)$$

Действующие на НС помехи делятся на внешние и внутренние. Внешние помехи вызваны действием сторонних электромагнитных полей. Внутренние помехи обусловлены действием электромагнитных полей соседних проводников в направляющей системе (или взаимными влияниями). Практически идеальной направляющей системой является волоконный световод, так как на него не действуют внешние поля и в световоде отсутствуют взаимные влияния.

Направляющая система – это непрерывная по длине конструкция, направляющая распространение электромагнитной энергии в заданном направлении, т.е. обладающая канализирующими свойствами.

К направляющим системам предъявляются следующие требования:

- высокая информационная ёмкость;
- малые потери электромагнитной энергии в процессе её распространения;
- возможность передачи различных видов информации, т.е. сигналов с различными видами модуляции;
- малые взаимные влияния;
- постоянство параметров НС в процессе длительного срока эксплуатации;
- обеспечение необходимого качества и дальности связи.

По направляющим системам передаются различные виды информации: телефония, радиовещание, телевидение, телеграфия, передача данных.

Одним из наиболее сложных и дорогостоящих элементов техники связи являются линии связи (ЛС). *Линия связи* – комплекс технических сооружений, обеспечивающий передачу как узкополосных, так и широкополосных каналов, используемых для передачи информации от отправителя к получателю на заданное расстояние с заданным качеством. Эффективность работы систем определяется качеством ЛС, их свойствами, параметрами, воздействием на ЛС различных факторов. Линии связи состоят из нескольких подсистем, обеспечивающих их функционирование: оконечных пунктов, обслуживаемых и необслуживаемых усилительных (регенерационных) пунктов.

1.2. Классификация линий связи

Линии связи делятся на два типа – беспроводные (радиолинии) и проводные на основе тех или иных направляющих систем. Классификация ЛС представлена на рис. 1.2.

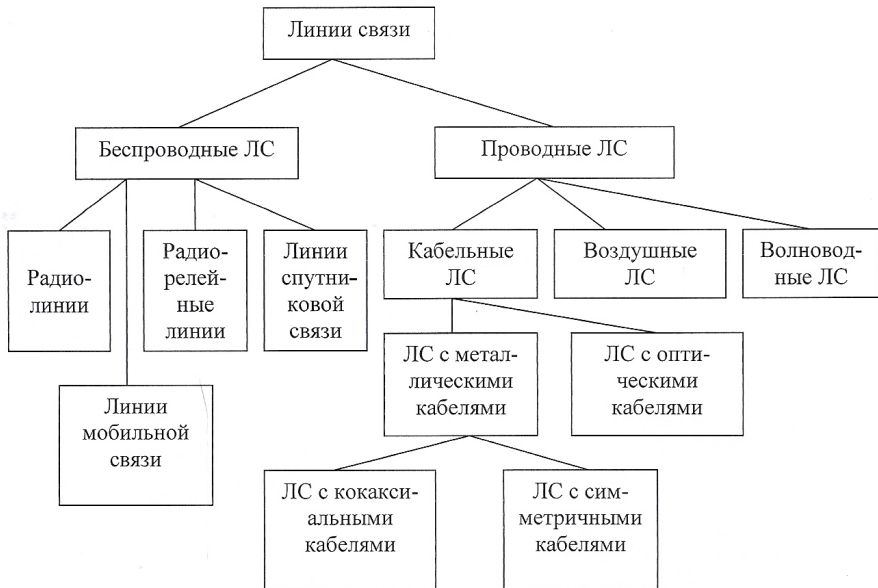


Рис. 1.2. Классификация линий связи

Отличительной особенностью проводных ЛС является то, что передача информации от одного абонента к другому осуществляется по специально созданным на основе направляющих систем цепям. Характер распространения

электромагнитных волн в различных средах и направляющих системах определяется частотными диапазонами, в которых работают эти системы.

Беспроводные и проводные ЛС имеют свои особенности, достоинства и недостатки. К ЛС предъявляется ряд требований, выполнение которых обеспечивает высокую эффективность при их эксплуатации, необходимое качество связи, дальность связи.

1.3. Физические основы передачи электромагнитной энергии по световодам

Волоконный световод представляет собой тонкую двухслойную нить из кварца с пластмассовым покрытием (рис.1.3). Рассмотрим физические процессы, происходящие в волоконных световодах оптических кабелей (ОК) при передаче по ним электромагнитной энергии.

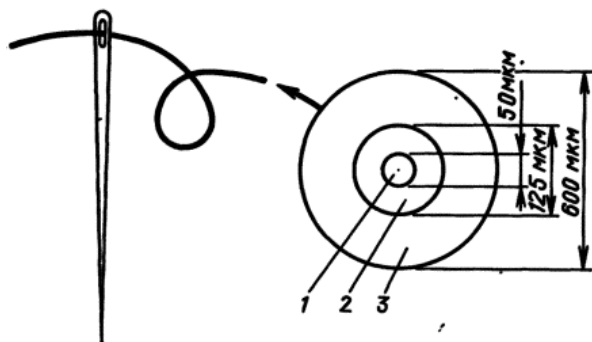


Рис. 1.3. Оптическое волокно: 1 - сердцевина; 2 – оболочка; 3 – покрытие

В отличие от обычных кабелей, обладающих электрической проводимостью и током проводимости J_{np} , оптические кабели имеют совершенно другой механизм передачи энергии, а именно, токи смещения $J_{см}$, на основе которых действует также радиопередача. Отличие от радиопередачи состоит в том, что волна распространяется не в свободном пространстве, а концентрируется в самом объеме световода и передается по нему в заданном направлении (рис. 1.4).

В обычных кабелях с медными проводниками носителем передаваемой информации является электрический ток, а в оптических кабелях со световодами – лазерный луч. Волны по световоду в заданном направлении передаются за счет отражений их от границы раздела сердечника и оболочки, имеющих разные показатели преломления (n_1 и n_2).

В широко используемых в настоящее время симметричных и коаксиальных кабелях энергия передается токами проводимости по двухпроводной схеме с применением прямого и обратного проводников цепи (рис. 1.5 а). В световодах, волноводах и других направляющих системах нет двух проводников, и передача энергии происходит волноводным методом по закону многократного отражения волны от границ раздела сред (рис. 1.5 б). Такими отражающими границами раздела могут быть «металл-диэлектрик», «диэлектрик-диэлектрик» с разными диэлектрическими (оптическими) свойствами.

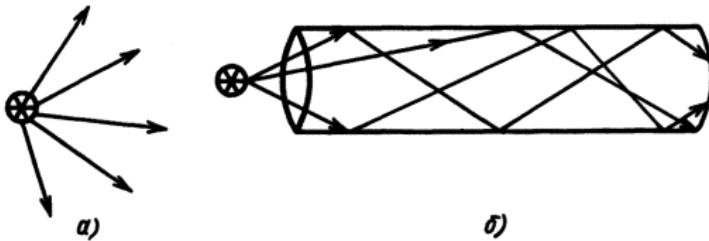


Рис. 1.4. Радиопередача (а) и передача по световоду (б)

Граница раздела двухпроводных (двухсвязных) и волноводных (односвязных) НС характеризуется в основном соотношением между длиной волны λ и поперечными размерами (диаметром) d направляющей системы. При $\lambda > d$ в большинстве случаев необходимо иметь два провода: прямой и обратный. Передача в этом случае происходит по двухпроводной схеме. При $\lambda < d$ двухпроводная схема не требуется, передача осуществляется за счет многократного отражения волны от раздела сред с различными характеристиками.

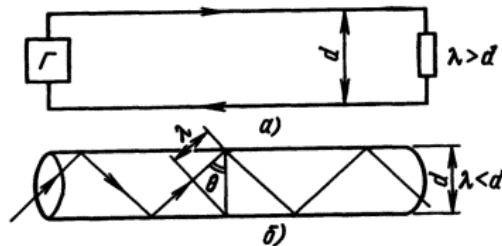


Рис. 1.5. Двухпроводные (а) и волноводные направляющие системы (б)

Для связи по световодам используются видимые лучи ($0,4 \dots 0,75$ мкм) и ближний диапазон инфракрасных лучей ($0,85 \dots 1,3$; $1,55 \dots 6$ мкм). При этом, как и по волноводам, возможна передача большого числа различных типов волн – мод. Исходя из двойственной природы света (лучевой и волновой) различным типам волн – модам соответствует различное число лучей.

Число мод зависит от соотношения диаметра d сердцевины световода и длины волны λ . С увеличением d число передаваемых мод резко возрастает. Для обеспечения одномодового режима передачи необходимо иметь очень малый диаметр сердцевины световода, соизмеримый с длиной волны ($d \approx \lambda$).

Достоинствами одномодовых систем являются малая дисперсия (искажение сигналов), большая информационно-пропускная способность и большая дальность передачи. Одномодовые системы являются наиболее перспективным направлением развития техники передачи информации.

При многомодовой передаче за счет дисперсии импульс на приеме уширяется и искажается. Это обусловлено тем, что различные моды (лучи) идут под разными углами, проходят разный путь и к концу линии приходят в различные отрезки времени. Дисперсия в многомодовых световодах существенно ограничивает полосу передаваемых частот и дальность передачи. При одномодовой передаче распространяется лишь один луч и нет модовых искажений. Поэтому одномодовые световоды позволяют передавать большой объем информации на большие расстояния.

Рассмотрим режим *полного внутреннего отражения* волоконного световода.

Учитывая, что в световоде с границей раздела сред «сердцевина-оболочка» являются прозрачные стекла, возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения. Реализация этого условия применительно к двухслойному волноводу показана на рис. 1.6.

По законам геометрической оптики в общем виде на границе «сердечник-оболочка» будут падающая волна с углом φ_n , отраженная с углом φ_o и преломленная с углом φ_{np} (рис. 1.6, точка А). Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, т.е. при $n_1 > n_2$, волна при определенном угле падения полностью отражается и не проходит в другую среду (рис. 1.6, точка В). Угол падения φ_n , начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, т.е. при $\varphi_n = \theta_c$, называется *углом полного внутреннего отражения*: $\sin \theta = n_1/n_2$, где n_1 и n_2 – соответственно показатели преломления сердечника и оболочки.

При $\varphi_n > \theta_c$ энергия, поступившая на сердечник, полностью отражается и распространяется по световоду (рис. 1.6, луч 3 в точке В). Чем больше угол падения волны, т.е. $\varphi_n > \theta_c$ в пределах от θ_c до 90° , тем лучше условия распространения и тем быстрее волна придет к приемному концу. В этом

случае энергия концентрируется в сердечнике световода и практически не излучается во внешнее пространство. При угле, меньшем угла полного внутреннего отражения, т.е. $\varphi_n < \theta_в$, энергия проникает в оболочку и передача по световоду неэффективна (рис. 1.6, лучи 1 и 2 в точках А и Б).

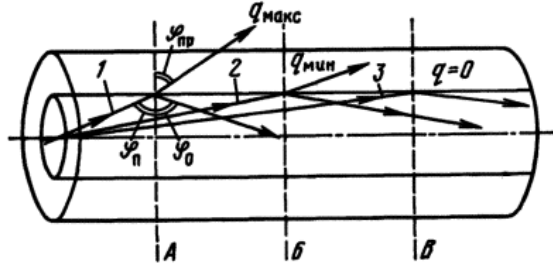


Рис. 1.6. Прохождение лучей в двухслойном волноводе

Режим полного внутреннего отражения предопределяет условие подачи света во входной торец волоконного световода. Световод пропускает лишь свет, заключенный в пределах телесного угла (θ_A), величина которого обусловлена углом полного внутреннего отражения ($\theta_в$). Этот телесный угол θ_A характеризуется апертурой.

Апертура – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения. Обычно пользуются понятием числовой апертуры

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

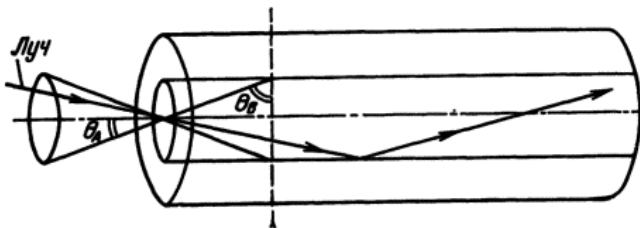


Рис. 1.7. Апертура волоконного световода

Как видно из рис. 1.7, между углом полного внутреннего отражения ($\theta_в$) и апертурным углом падения луча (θ_A) имеется взаимосвязь. Чем больше угол $\theta_в$, тем меньше апертура волокна θ_A . Следует стремиться к тому, чтобы угол

падения луча на границу «сердечник-оболочка» φ_n был больше угла полного внутреннего отражения θ_v и находился в пределах от θ_v до 90° , а угол ввода луча в торец световода укладывался в апертурный угол θ_A ($\varphi < \theta_A$).

1.4. Структурная схема волоконно-оптической связи

Принципиальная схема передачи информации по ОК приведена на рис. 1.8. Информация, передаваемая абонентами через передатчик, поступает на электрооптический преобразователь (ЭОП), роль которого выполняет лазер (Л) или светодиод (СД).

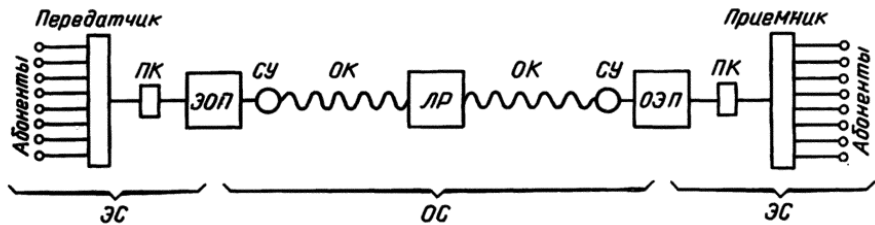


Рис. 1.8. Принципиальная схема волоконно-оптической связи

Здесь электрический сигнал преобразуется в оптический и направляется в ОК. На приеме оптический сигнал поступает в оптикоэлектрический преобразователь (ОЭП), в качестве которого используется фотодиод (ФД), который преобразует оптический сигнал в электрический. Таким образом, на передающей стороне от передатчика до ЭОП, а также на приемной стороне от ЭОП до приемника действует электрический сигнал, а от ЭОП до ОЭП по оптическому кабелю проходит оптический сигнал.

Электрический сигнал, создаваемый частотным или временным методом, модулирует оптическую несущую, и в модулируемом виде световой сигнал передается по оптическому кабелю. В основном используется способ модуляции интенсивности оптической несущей, при котором от амплитуды электрического сигнала зависит мощность, подаваемая на ОК.

Оптические системы передачи, как правило, являются цифровыми (импульсными). Это объясняется тем, что передача аналоговых сигналов требует высокой степени линейности промежуточных усилителей, которую трудно обеспечить в оптических системах.

Через определенные расстояния (5, 10, ..., 50 км), обусловленные энергетическим потенциалом аппаратуры и величиной потерь энергии в ОК, вдоль оптической линии располагаются линейные регенераторы (ЛР), в которых сигнал восстанавливается и усиливается до требуемого значения. Кроме того, для преобразования кода и согласования элементов схемы имеются кодирующие устройства – преобразователи кода (ПК) и согласующие

устройства (СУ). Применяются также устройства ввода и вывода излучения, сростки для сращивания оптических волокон и кабелей, направленные ответвители, фильтры и другие элементы оптического тракта.

Свойства ОК определяются главным образом двумя передаточными характеристиками: затуханием и дисперсией. *Затухание* ограничивает длину регенерационных участков (расстояние между регенераторами) и дальность передачи по кабелю. *Дисперсия* приводит к искажению передаваемых сигналов и определяет частотную ширину тракта и пропускную способность кабеля.

Существующие волоконно-оптические системы передачи и оптические кабели по своему назначению подразделяются на пять групп: магистральные, зонные, городские, объектовые и подводные. В отдельную группу выделяются монтажные ОК.

2. Основы теории передачи по ВОЛС

2.1. Типы световодов

Простейший световод представляет собой круглый или прямоугольный диэлектрический стержень, называемый сердечником, окруженный диэлектрической оболочкой. Показатель преломления материала сердечника $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, а оболочки $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$, где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости. Относительная магнитная проницаемость материала обычно постоянна и равна единице. Показатель преломления оболочки постоянен, а сердечника в общем случае является функцией поперечной координаты (радиуса, например, в случае круглого световода). Эту функцию называют *профилем показателя преломления*.

Для передачи электромагнитной энергии по световоду используется известное явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектрических сред, поэтому необходимо, чтобы $n_1 > n_2$. В зависимости от величины угла θ , который образует с осью лучи, выходящие из точечного источника в центре торца световода (рис. 2.1), возникают волны излучения 1, волны оболочки 2 и сердечника 3. В сердечнике и оболочке существуют два типа лучей: меридиональные, которые пересекаются в некоторой точке с осью световода, и косые, которые с осью световода не пересекаются. На рис. 2.1 показаны меридиональные лучи. Если угол падения электромагнитной волны на границу «сердцевина-оболочка» больше некоторого критического угла $\theta_{кр}$, который определяется соотношением $n_1 \sin \theta_{кр} = n_2$, то луч полностью отражается на границе и остается внутри сердечника (луч 3). Разность показателей преломления на границе «сердечник-оболочка» обычно составляет 1%. Оболочка защищает распространяющийся по сердечнику свет от любых внешних воздействий и помех.

Такое объяснение направляемости света основано на законах геометрической оптики и не учитывает свойств света как электромагнитной волны. Учет волновых свойств света позволяет установить, что в пределах угла полного внутреннего отражения для данного световода только ограниченное число лучей с дискретными углами может образовывать направляемые волны, которые называют также *волноводными модами*. Эти лучи характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы «сердечник-оболочка» (или «оболочка-окружающее пространство») волны должны быть в фазе. Если это условие не выполняется, то волны интерferируют так, что гасят друг друга и исчезают. Каждая волноводная мода обладает характерной для нее структурой электромагнитного поля, фазовой и групповой скоростями.

Волны излучения распределяются непрерывно по всей принадлежащей им области углов и образуют непрерывный спектр. Волны оболочки и волны излучения – паразитные волны, которые отбирают энергию источника возбуждения и уменьшают полезную энергию, передаваемую по сердечнику. Эти волны трудно полностью исключить при возбуждении световода. Кроме того, они также возникают на геометрических нерегулярностях световода и неоднородностях материала.

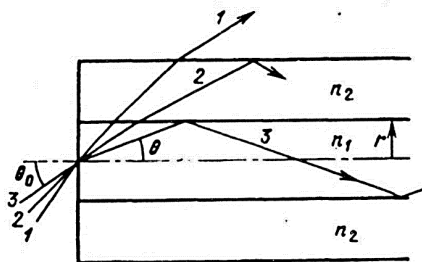


Рис. 2.1. Меридиональные лучи в волоконном световоде

В зависимости от числа распространяющихся на рабочей частоте волн (мод) световоды разделяются на одно- и многомодовые.

Для характеристик световода важное значение имеет профиль показателя преломления в поперечном сечении. Большой практический интерес представляют неоднородные в поперечном сечении световоды, так как они могут иметь такие характеристики, которые невозможно получить у однородных световодов. Если сердечник световода имеет постоянное по радиусу значение показателя преломления, то такие световоды называются *световодами со ступенчатым профилем показателя преломления* (есть ступенька n на границе «сердечник-оболочка»). Если показатель преломления от центра к краю изменяется не ступенчато, а плавно, то такие световоды называются *световодами с градиентным профилем показателя преломления*,

или *градиентными световодами*. Ход лучей в градиентном световоде показан на рис 2.2. Как видно, лучи теперь изгибаются в направлении градиента показателя преломления (вместо преломления либо полного отражения, как в случае волокна со ступенчатым профилем на рис. 2.1).

Наиболее изучены характеристики световодов, для которых профиль показателя преломления описывается функцией

$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^g]^{1/2}, 0 \leq r \leq a,$$

где r – текущий радиус; $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ – относительная разность показателей преломления; n_1 – наибольшее значение показателя преломления сердечника; g – показатель степени, определяющий изменение $n(r)$; a – радиус сердечника.

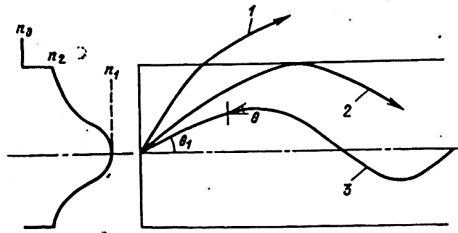


Рис. 2.2. Ход лучей в градиентном световоде: 1 – волна излучения; 2 – волна оболочки; 3 – волна сердечника

Световоды с $g=2$ называют *параболическими*, так как профиль показателя преломления описывается параболой. При изготовлении градиентных световодов по техническим причинам часто получают в центре сердцевины область с уменьшенным значением показателя преломления. Такие световоды получили название световодов с осевым провалом в профиле диэлектрической проницаемости.

Важной характеристикой световода является числовая апертура NA , представляющая собой синус максимального угла падения лучей на торец световода, при котором в световоде луч на границу «сердцевина-оболочка» падает под критическим углом $\theta_{кр}$:

$$NA = n_0 \sin \alpha_M = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

От значения NA зависят эффективность ввода излучения лазера или светодиода в световод, потери на микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

При анализе характеристик световодов удобно пользоваться нормированными параметрами:

$$U = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA - \text{нормированная частота};$$

$f(\rho) = [\varepsilon(\rho) - \varepsilon_2] / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = [\varepsilon(\rho) - \varepsilon_2] (NA)^2$ – нормированный профиль показателя преломления градиентного световода;

$b = [(\beta\lambda / 2\pi)^2 - n_2^2] / (n_1^2 - n_2^2)$ – нормированная постоянная распространения.

В формулах $\rho = r/a$; λ – рабочая длина волны; β – модовая постоянная распространения, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Геометрические размеры сердечника и оболочки – также важные параметры световодов. У одномодового световода диаметр сердечника необходимо выбирать таким, чтобы обеспечивались условия распространения только основной моды.

Постоянное совершенствование ВОЛС в направлении увеличения скорости передачи информации и длины участка регенерации поставило задачу создания так называемых когерентных ВОЛС с гетеродинным методом приема оптических сигналов. Для этих ВОЛС необходимы одномодовые световоды, сохраняющие поляризацию передаваемого излучения на большой длине. Однополяризованные световоды нужны также и для целого ряда других применений. Например, в волоконных гироскопах.

Планарный световод является основой почти всех устройств интегральной оптики: модуляторов, переключателей, дефлекторов света, микролазеров, соединителей, фильтров, направленных ответвителей и т.д. Он состоит из пленки с показателем преломления n_1 и прилегающих к пленке сверху и снизу сред с меньшими показателями преломления n_0 и n_2 соответственно, причем $n_1 > n_2 \geq n_0$. Световод называется *несимметричным*, если $n_2 \neq n_0$ и *симметричным*, если $n_2 = n_0$. В них существуют направляемые моды и моды излучения. Число распространяющихся мод N не зависит от соотношения между толщиной световода d и длиной волны λ , а также разности между показателями преломления световода и подложки. Оно определяется соотношением $N = (2d/\lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Чем меньше разность показателей преломления, тем меньше число распространяющихся мод при той же толщине световода.

2.2. Элементы волновой теории световодов

Анализ световодов методами геометрической оптики позволяет получить ряд полезных результатов, однако детальное исследование характеристик световодов, особенно по мере приближения размера сердечника световода к длине волны света, возможно только в рамках волновой теории путем решения уравнений Максвелла. В большинстве случаев световоды однородны вдоль направления распространения электромагнитных волн и изготовлены из материалов, магнитная проницаемость которых равна проницаемости вакуума μ_0 , а диэлектрическая проницаемость изотропна является непрерывной

функцией поперечных координат. Тогда комплексные амплитуды векторов напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей распространяющихся волн удовлетворяют полученным из системы уравнений Максвелла следующим волновым уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 E_m + \nabla \left(\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} E_m \right) + \kappa^2 \varepsilon E_m &= 0; \\ \nabla^2 H_m + \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \nabla H_m + \kappa^2 \varepsilon H_m &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; $\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_0$ – относительная и ε_a – абсолютная диэлектрические проницаемости среды; $k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства; ω – круговая частота.

Для определения полей в световодах, однородных вдоль направления распространения волн, достаточно найти либо продольные E_z , H_z , либо поперечные $E_\perp$, $H_\perp$ составляющие векторов напряженностей электрического и магнитного полей.

В зависимости от конкретной задачи система уравнений (2.1) и граничные условия, которые представляют собой математическую модель распространения электромагнитных волн вдоль диэлектрических световодов с переменной в поперечном сечении диэлектрической проницаемостью (в неоднородной среде), могут упрощаться.

Круглый диэлектрический световод состоит из сердечника с переменной по радиусу диэлектрической проницаемостью, окружающей его оболочки, диэлектрическая проницаемость которой постоянна и меньше, чем наибольшее значение ε в сердечнике.

Вдоль круглого неоднородного диэлектрического световода с осесимметричным распределением ε в сердечнике ($d_\varepsilon / d_\varphi = 0$) возможно распространение дискретного числа различных по структуре поля типов колебания (или мод). Они отличаются числом n вариаций поля по азимуту и m – по радиусу сердечника, а также соотношением между продольными компонентами E_z , H_z . При $n=0$ поле обладает круговой симметрией и существуют моды TE_{0m} и TM_{0m} . При $n \geq 1$ каждая мода имеет одновременно продольные компоненты как электрического E_z , так и магнитного H_z полей. Эти моды называют *гибридными* и обозначаются HE_{nm} и EH_{nm} . Все составляющие электромагнитного поля в волноводе обычно определяют через составляющие E_z и H_z . Уравнения (2.1) для них записываются в виде

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left[k^2 \varepsilon(r) - \beta^2 - \frac{n^2}{r^2} \right] E_z = \\
 & = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dr} \frac{\beta^2}{\chi^2} \left[\beta \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{\omega \mu_0}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right], \\
 & \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \left[k^2 \varepsilon(r) - \beta^2 - \frac{n^2}{r^2} \right] H_z = \\
 & = \frac{d\varepsilon}{dr} \frac{k^2}{\chi^2} \left[\frac{\partial^2 H_z}{dr} - \frac{\beta}{\omega \mu_0 r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \right], \chi^2 = k^2 \varepsilon(r) - \beta^2.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

В световодах при передаче импульсных сигналов после прохождения некоторого расстояния импульсы искажаются и расширяются (наступает момент, когда соседние импульсы перекрывают друг друга). Данное явление в теории световодов носит название *дисперсии*. Расширение импульсов устанавливает предельные скорости передачи информации по световоду при импульсно-кодовой модуляции и при малых потерях ограничивает длину ретрансляционного участка. Дисперсия ограничивает также ширину полосы пропускания световода.

Рассмотрим явление дисперсии более подробно. Распространение импульса электромагнитной энергии по световоду может быть представлено упрощенно в виде ряда лучей, как показано на рис. 2.1. Время пробега аксиальным лучом расстояния l составляет

$$t_a = l / v_\phi = l n_1 / c,$$

где v_ϕ — фазовая скорость электромагнитной волны, которая определяется коэффициентом преломления среды.

Время пробега того же расстояния l наклонным лучом с максимально возможным значением угла φ_m

$$t_n = l n_1 / (c \cos \varphi_m).$$

Так как максимальное значение φ_m определяется критическим углом полного внутреннего отражения $\theta_{кр}$ то

$$t_n = l n_1 / (c \sin \theta_{кр}) = n_1 l (n_2 c).$$

Когда эти два луча, переносящие электромагнитную энергию, складываются вместе, наклонный луч по сравнению с аксиальным лучом имеет временное запаздывание

$$\Delta t = t_n - t_a = \frac{n_1}{n_2} \frac{l}{c} (n_1 - n_2) = \frac{n_1}{n_2} \frac{l}{c} \Delta n$$

Временное запаздывание на единицу длины

$$\frac{\Delta t}{l} = \frac{n_1}{n_2} \frac{\Delta n}{c}. \quad (2.3)$$

Это приводит к тому, что форма выходного импульса по сравнению со входным импульсом искажается, импульс расширяется во времени. Такое

явление называется *межмодовой дисперсией* и проявляется в многомодовых световодах. Однако это не единственная дисперсия в волоконных световодах.

Дисперсия определяется тремя главными составляющими: межмодовой дисперсией, волноводной или внутримодовой дисперсией (нелинейной зависимостью постоянной распространения моды от частоты) и материальной дисперсией (зависимостью коэффициента преломления материала световода от частоты). В многомодовых световодах основной вклад оказывает межмодовая дисперсия, а в одномодовых световодах – внутримодовая и материальная дисперсии.

Для дисперсионной среды, где коэффициент преломления зависит от частоты $n(\omega)$, вводится групповой показатель преломления

$$N_{gp} = \frac{c}{v_{gp}} = c \frac{d\beta}{d\omega} = c \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\omega n}{c} \right) = \frac{d(\omega n)}{d\omega} = n + \frac{d\omega n}{d\omega}.$$

Учитывая, что

$$\frac{dn}{d\omega} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega}, \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\omega}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2},$$

выражение для группового показателя преломления можно записать в виде

$$N_{gp} = n + \frac{2\pi c}{\lambda} \frac{dn}{d\lambda} \left(\frac{-\lambda^2}{2\pi c} \right) = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

и групповую скорость

$$v_{gp} = \frac{c}{N_{gp}} = \frac{c}{[n - \lambda dn/d\lambda]}. \quad (2.4)$$

Далее можно определить время распространения импульса электромагнитной энергии через дисперсионную среду длиной l :

$$t = \frac{l}{v_{gp}} = \frac{N_{gp} l}{c} = \left[n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] \frac{l}{c}.$$

Если среда распространения обладает дисперсией и ширина спектра излучения составляет $\Delta\lambda$, то световые импульсы при распространении расширяются:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{dt}{d\lambda} \Delta\lambda = \frac{l}{c} \frac{dN}{d\lambda} \Delta\lambda = \\ &= \frac{l}{c} \left[\frac{d}{d\lambda} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \right] \Delta\lambda = -\frac{l}{c} \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Delta\lambda. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Ширину спектра излучения обычно определяют по уровню половинной мощности. Удобно ввести относительную ширину спектра излучения

$$\gamma = |\Delta\lambda / \lambda|. \quad (2.6)$$

Тогда после распространения импульса в дисперсионной среде на расстоянии l ширина его на уровне половинной мощности определится следующим соотношением

$$\tau = \frac{l}{c} \gamma \left| \lambda^2 \frac{d^2 n}{d \lambda^2} \right|. \quad (2.7)$$

Здесь $\lambda^2 \frac{d^2 n}{d \lambda^2}$ представляет коэффициент материальной дисперсии. Для чистого кварца на длине волны $\lambda=1,126$ мкм коэффициент меняет знак. Эта точка известна в литературе как длина волны нулевой материальной дисперсии.

2.3. Затухание

Важнейшим параметром световода является затухание передаваемой энергии. Для заданных значений скорости передачи информации и вероятности ошибки мощность на входе фотодетектора должна быть больше некоторой определенной величины. Потери световода наряду с дисперсией определяют длину ретрансляционного участка ВОЛС, т.е. расстояние, на которое можно передавать сигнал без усиления. В тех участках спектра, где существуют надежные источники излучения, световоды должны иметь минимально возможное затухание. Существуют две главные причины потерь в световодах: поглощение и рассеяние энергии. *Потери на поглощение* состоят из собственного поглощения и поглощения из-за наличия в стекле ионов. Собственное поглощение наблюдается в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Существенную роль играет рассеяние (переизлучение) энергии. Различают линейное и нелинейное рассеяния. При линейном рассеянии мощность рассеяния пропорциональна мощности падающей волны. В этом случае происходит частичное изменение направления потока энергии. При нелинейном рассеянии в спектре рассеянной мощности наблюдаются новые частотные компоненты.

Рассеяние, возникающее в результате флуктуаций показателя преломления, называется *рэлеевским*. На неоднородных включениях, содержащих примесь, размер которой сравним с λ , происходит линейное рассеяние. Рассеяние также возникает из-за различных нарушений геометрии световода, наличия соединителей, изгибов и микроизгибов.

При достаточно больших передаваемых мощностях могут возникнуть нелинейные процессы, изменяющие параметры материала. В результате возможно появление вынужденного рассеяния, направленного в сторону распространения электромагнитной энергии, а также вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Последнее явление вызвано тем, что при превышении некоторого порога мощности нелинейные процессы приводят к переходу мощности первичных волн в излучение других длин волн. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в основном направлено в сторону, противоположную распространению электромагнитной энергии.

Нелинейные эффекты наблюдаются при уровнях мощности порядка 100 мВт в одномодовом и 2,5 Вт в многомодовом волокнах. В ВОЛС обычно используются источники излучения мощностью порядка десятков милливатт, поэтому нелинейные эффекты не наблюдаются.

2.4. Расчет дисперсии световодов

В одномодовых световодах распространяется только одна мода HE_{11} и уширение импульсов обуславливается зависимостью от длины волны показателя преломления материала (материальной дисперсией) и дисперсией световода как направляющей системы (волноводной дисперсией). Внутримодовая дисперсия определяется формулой

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\sigma_{\lambda} L}{\lambda} \left| \lambda \frac{dt}{d\lambda} \right| = 2\pi \frac{\sigma_{\lambda} L}{\lambda^2 c} \left| \frac{d^2 \beta}{dk^2} \right|, \quad (2.8)$$

где t – коэффициент группового замедления основной моды; λ – средняя длина волны излучения; β – продольная постоянная распространения моды HE_{11} .

Дисперсионной характеристикой моды называют зависимость ее от частоты или длины волны. Для световодов эту характеристику часто представляют в нормированном виде как зависимость нормированной постоянной распространения b от нормированной частоты V . Здесь

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}. \quad (2.9)$$

Для поверхности мод b принимает значения в интервале от 0 до 1. Среднеквадратическое уширение основной моды можно определить с помощью выражения (2.8), если численно продифференцировать дисперсионную характеристику моды $\beta(k)$, которая рассчитана с учетом зависимости профиля показателя преломления световода от длины волны:

$$\varepsilon(\rho) = \varepsilon_2 + f(\rho)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2).$$

В общем случае от длины волны зависят $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и $f(\rho) = (\varepsilon(\rho) - \varepsilon_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$.

На практике, особенно для расчета градиентных световодов, удобнее рассчитывать дисперсионную характеристику световода без учета спектральной зависимости параметров ε_1 и ε_2 световодов, а их вклад в дисперсию учесть отдельно. Из выражения (2.9) получим

$$\beta = k \left[n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2) b \right]^{1/2}. \quad (2.10)$$

Предполагается, что нормированная постоянная распространения вычислена для заданных $f(\rho)$ и V в случае приближения линейно-поляризованных мод. Так как в световоде $b < 1$ и $\Delta < 1$, то $b\Delta < 1$ и выражение (2.10) принимает вид

$$\beta \approx kn_2(1 + b\Delta). \quad (2.11)$$

Это приближение приводит к неточности порядка 0,1% в определении длины волны минимальной дисперсии. Дифференцируя (2.11) по k , получаем

$$\frac{d\beta}{dk} = \left\{ n_2 N_2 + \left[b + \frac{1}{2} V \frac{dV_b}{dV} \right] (n_1 N_1 - n_2 N_2) \right\} / \left[n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2) b \right]^{1/2}. \quad (2.12)$$

где $N_i = \frac{dn_i}{dk} = n_i - \lambda \frac{dn_i}{d\lambda}$ – групповой показатель преломления в материале сердечника n_1 ($i=1$) и в материале оболочки n_2 ($i=2$). Еще раз дифференцируя (2.12) по n и учитывая, что $b\Delta \ll 1$, получаем

$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\lambda} L |D| = \sigma_{\lambda} L [T_1 + T_2 + T_3]. \quad (2.13)$$

Здесь $T_1 = \frac{\lambda}{c} \left[A(V) \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} + (1 - A(V)) \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} \right]$ – дисперсия материалов

сердечника и оболочки; $T_2 = \frac{n_2 \Delta}{c\lambda} B(n) \frac{d^2 V_b}{dV^2}$ – волноводная дисперсия;

$T_3 = -\frac{n^2}{c} C(n) D(n) \frac{d\Delta}{d\lambda}$ – дисперсия профиля показателя преломления.

В формулах

$$A(V) = \frac{1}{2} \left[\frac{dV_b}{dV} + b \right]; \quad B(n) = \left[1 - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn_2}{d\lambda} \right]$$

$$C(n) = 1 - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn_2}{d\lambda} - \frac{\lambda}{4\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda};$$

$$D(n) = V \frac{d^2 V_b}{dV^2} + \frac{dV_b^2}{dV} - b.$$

Наибольший вес имеют члены T_1 и T_2 , определяемые соответственно дисперсией материала и волноводной дисперсией, причем вклад в полную дисперсию вносят как материал сердцевины, так и материал оболочки. Чем больше постоянная распространения, тем больше параметр $A(V)$ и больше удельная значимость материальной дисперсии.

Если

$$(n_1 - n_2)/n_1 \approx (N_1 - N_2)/N_1 \ll 1,$$

то выражение для полной дисперсии получается более простым. В этом случае из (2.13) имеем

$$\frac{d\beta}{dk} \approx N_2 + (N_1 - N_2) \frac{dV_b}{dV}.$$

Тогда среднеквадратическое уширение импульса

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\sigma_{\lambda} L}{\lambda} \left| M \lambda \left[1 + \Delta \frac{dV_b}{dV} \right] + \frac{N_2 \Delta}{c} \left[V \frac{d^2 V_b}{dV^2} - P \frac{dV_b}{dV} \right] \right|, \quad (2.14)$$

где $M = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2}$ – удельная материальная дисперсия стекла световода. Параметр

$$P = \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda} \text{ мал.}$$

При малых Δ и на коротких длинах волны $\lambda < 1$ мкм можно считать, что $P \approx 0$ и $\Delta \frac{dV_b}{dV}$. Тогда из выражения (2.14) для расчета среднеквадратического уширения основной моды получим соотношение

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\sigma_{\lambda} L}{\lambda} \left[M \lambda + \frac{d^2 V_b}{dV^2} \right]. \quad (2.15)$$

Первый член в выражении (2.15) определяется дисперсией материала, второй – волноводной дисперсией.

2.5. Потери на изгибах и микроизгибах световодов

Световоды на изгибах теряют мощность на излучение. Это приводит к дополнительным потерям, которые могут быть малы, если радиус кривизны изгиба достаточно велик.

Рассмотрим основные физические принципы, объясняющие появление потерь при изгибе световода.

Естественно, что скорость движения фазового фронта на той границе световода, которая ближе к центру кривизны, будет меньше фазовой скорости моды в прямом волноводе, а по другую границу световода – больше и по мере увеличения расстояния от центра кривизны фазовая скорость возрастает. На некотором расстоянии от центра кривизны скорость фазового фронта будет равняться скорости плоской волны в среде, окружающей световод. Так как электромагнитная волна не может распространяться со скоростью, превышающей скорость плоской волны в окружающей среде, то эта часть поля отделяется от поля направляемой моды и излучается в окружающее пространство. Таким образом, изгибы световодов вызывают увеличение электромагнитной связи между направляемыми модами и модами излучения, изменяя модовое распределение, в результате чего увеличиваются потери на излучение.

Для оценки потерь α_n (дБ) на изгибе радиуса R в многомодовом световоде можно воспользоваться приближенной формулой

$$\alpha_n = 10 \lg \left(1 - \frac{a}{R\Delta} \right)^g,$$

где $g=1$ и 2 для световодов со степенным и ступенчатым профилями показателя преломления соответственно.

В процессе покрытия световода различными защитными оболочками, а также при изготовлении и прокладке оптических кабелей возникают малые отклонения оси световода от прямой линии, которые называют *микроизгибами*.

Потери α_n (дБ) вызванные хаотическими изгибами, могут быть вычислены с помощью следующей формулы для градиентного световода:

$$\alpha_n = 4,34V_{01}^2 \frac{\pi}{4\Delta} g_c \left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a} \right), \quad (2.16)$$

где $V_{01}=3,832$, $g_c(\sqrt{2\Delta}/a) = c^2 l / [\pi(1+2\Delta l^2 \sqrt{a^2})]$ – спектральная плотность функции $R(z)$.

Рассмотрим потери при изгибе одномодовых световодов. Полные потери на изгибе

$$\alpha_\Sigma = 2\alpha_n + \alpha_n, \quad (2.17)$$

где α_n – потери на переходе от прямого световода к изогнутому, а также на переходе от изогнутого световода к прямому; α_n – потери на изогнутом участке световода.

Потери α_n (дБ/км) при резком переходе от прямого световода к изогнутому по дуге радиуса R можно рассчитать по формуле

$$\alpha_n = 0,271 \frac{V^4 n_2^2}{(R/a)^2 (n_1 - n_2)^2} \left(0,65 + \frac{1,62}{\sqrt{V^3}} + \frac{2,88}{V^6} \right)^6. \quad (2.18)$$

Если переход от прямого световода к изогнутому плавный, то потери существенно уменьшаются. Потери на изогнутом участке световода L при постоянном радиусе изгиба R можно определить по формуле, дБ/км:

$$\alpha_n = 3,849 \frac{(x_1)^2 \left[\exp - \frac{2}{3} \frac{x_2^3}{V^2} \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \frac{R}{a} \right] L}{V^2 k_1^2(x_2) \sqrt{x_2^3 \frac{R}{a}}}, \quad (2.19)$$

где $x_1 = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_3^2}$, $x_2 = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_3^2 - n_2^2}$ – безразмерные числа; $n_3 = c/V_\phi$ – эффективный показатель замедления фазовой скорости моды; k_1 – функция Макдональда первого порядка.

При малых радиусах кривизны и небольших длинах изогнутого участка световода потери на переходе α_n превышают потери на участке α_n . При $L/a > 100$ наибольшее значение имеют потери на изогнутом участке световода. При $R > 5$ см потерями на переходе от прямого к изогнутому световоду и потерями на изогнутом участке световода практически можно пренебречь.

2.6. Потери при стыковке световодов

Оценим потери, которые возникают при стыковке одинаковых одномодовых световодов со ступенчатым профилем показателя преломления

из-за поперечного смещения торца одного световода относительно торца другого, а также перекося световодов.

Для расчета потерь, вызванных поперечным смещением световодов на величину x , можно использовать формулу

$$\alpha_x = 2,17 \left[\frac{x_2 J_0(x_1)}{J_1(x_1)} \right]^2 \left(\frac{x}{a} \right)^2$$

при перекосе продольных осей на угол θ

$$\alpha_\theta = 3,31 \cdot 10^{-4} \left(\frac{W_0 V}{a} \right)^2 \frac{n^2}{n_1 - n_2} \theta^2,$$

где $W_0 = 0,816a \sqrt{\frac{J_0(x_1)}{x_1 J_1(x_1)} + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{x_1^2} - \frac{1}{x_1^2} \right)}$ – радиус моды HE_{11} световода.

Анализ результатов показывает, что для получения потерь при стыковке одномодовых световодов менее 0,1 дБ необходимо, чтобы относительное поперечное смещение торцов было меньше $x/a=0,1\dots0,2$, а угол перекося был меньше, чем $\theta=1^\circ$.

3. Оптоэлектронные компоненты

3.1. Светодиоды и полупроводниковые лазеры

Физической основой работы светодиодов является инжекционная электролюминесценция в полупроводниках. Механизм инжекционной люминесценции в светодиоде состоит из трех основных процессов: излучательной (и безызлучательной) рекомбинации в полупроводниках, инжекции избыточных неосновных носителей заряда в базу светодиода и вывода излучения из области генерации.

Излучательная способность светодиода характеризуется внутренней квантовой эффективностью $\eta_{\text{вн}}$, равной отношению числа рожденных в базе фотонов к числу инжектированных в нее носителей и внешней квантовой эффективностью $\eta_{\text{внш}}$, равной отношению числа фотонов, испущенных диодом, к полному числу носителей заряда, протекающего через него.

Наиболее легко и эффективно инжекция носителей осуществляется с помощью p - n перехода.

Для изготовления светодиодов и полупроводниковых лазеров наиболее перспективны структуры с гетеропереходами. *Гетеропереходами* называются переходы между полупроводниками из различных материалов, имеющих различную ширину запрещенной зоны. Для получения гетеропереходов хорошего качества параметры кристаллических решеток полупроводников, образующих переход, должны быть близки.

3.2. Фотоприемники

Фотоэлектрическим прибором называют прибор (фотодиод), электрические свойства которого изменяются под действием падающего на него излучения. Для ВОЛС используются следующие длины волн: 0,8...0,9 и 1,3...1,55 мкм. Это объясняется малым затуханием излучения в оптических волокнах на этих длинах волн.

Основными требованиями к фотоприемникам ВОЛС являются высокая чувствительность на рабочей длине волны, большое быстродействие, малые уровни шумов, стабильность к внешним температурным изменениям и хорошая надежность. Фотоэлектрическое преобразование позволяет осуществлять дальнейшую обработку информации на основе электронных схем, возможности которых при всех равных условиях ограничены соотношением сигнала к шуму на входе электронного тракта, следующего за фотодетектором. Селективные фотоприемники позволяют увеличить объем передачи информации на нескольких близких несущих частотах. Ширина полосы спектральной чувствительности фотоприемников $\Delta\lambda$, определяющая их селективность, должна совпадать с шириной полосы источников излучения.

3.3. Оптические разветвители

Разветвители (ответвители) сигнала играют важную роль в ВОЛС. Различают разветвители чувствительные (селективные) к длине волны и нечувствительные (неселективные). Первые применяются для объединения (или разъединения) сигналов с различными оптическими несущими и называются *мультиплексорами* (и демультиплексорами соответственно). Вторые используются для разветвления оптической мощности при наличии большого числа оконечных устройств в линии связи, подключения шины данных в ЭВМ, приема контрольного сигнала или сигнала обратной связи, предназначенного для управления мощностью источника излучения и т.д.

Делители оптической мощности. Неселективные разветвители подразделяют на два основных типа: Т-образные, построенные по принципу ответвления оконечных устройств от главного ствола линии, и звездообразные. Потери при распределении мощности излучения в системе с Т-образными соединителями возрастают пропорционально числу абонентов, а в системе со звездообразными ответвителями — пропорционально логарифму числа оконечных устройств N . Так, в системе с 20 оконечными устройствами общие потери составляют в первом случае 130 дБ, а во втором — 28 дБ. Поэтому в системах с большим числом абонентов целесообразно применение звездообразных соединительных устройств.

4. Волоконно-оптические системы передачи

4.1. Принципы построения систем передачи

В оптических системах передачи применяются в основном те же принципы образования многоканальной связи, что и в обычных системах передачи по электрическим кабелям, а именно частотного (ЧРК) и временного (ВРК) разделения каналов. В первом случае сигналы различаются по частоте и имеют аналоговую форму передаваемого сообщения. Во втором случае каналы различаются по времени, а импульсы имеют дискретный вид. Это соответствует цифровой передаче с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).

Во всех случаях оптической передачи электрический сигнал, создаваемый частотным или временным методом, модулирует оптическую несущую и затем передается по оптическому кабелю.

Возможны два вида модуляции: внешняя и внутренняя. При *внутренней модуляции* электрический сигнал непосредственно воздействует на излучение лазера, обеспечивая соответствующие интенсивность сигнала и форму. При *внешней модуляции* используется специальное модулирующее устройство, с помощью которого осуществляется воздействие передаваемого сигнала на уже сформировавшийся луч лазера. Для систем с полупроводниковыми лазерами применяется, как правило, внутренняя модуляция.

В основном используется метод модуляции интенсивности (МИ) оптической несущей, при котором от амплитуды электрического сигнала зависит мощность излучения, подаваемого в кабель, и закон изменения мощности оптического излучения повторяет закон изменения модулирующего сигнала. Непосредственно частотная и фазовая модуляция не могут быть применены, поскольку из-за шумного характера полупроводниковых источников излучения, работающих в оптическом диапазоне, сигнал не является синусоидальным, частотный спектр его имеет конечную ширину. Тем не менее данные виды модуляции могут быть реализованы путем изменения соответствующих параметров сигнала, модулирующего интенсивность излучения оптического источника.

Выбор метода МИ для оптических систем передачи обусловлен также простотой реализации как на передаче, так и приеме сигнала. На передаче используется полупроводниковый лазер, который обеспечивает непосредственное преобразование электрического сигнала в оптический, сохраняя его форму. Прием осуществляется фотодетектором, представляющим собой квадратичный прибор, выходной ток которого пропорционален входной мощности. Следовательно, подавая оптический сигнал непосредственно на фоточувствительную поверхность фотодетектора, можно преобразовать его в электрический, сохранив при этом форму.

Таким образом, наиболее распространенной волоконно-оптической системой связи является цифровая система с временным разделением каналов и импульсно-кодовой модуляцией интенсивности излучения источника. Двусторонняя связь осуществляется по двум волоконным световодам. По одному световоду передаются сигналы в направлении А-Б, по другому – в направлении Б-А. В обоих направлениях сигналы передаются на одной и той же оптической несущей (например, имеющей частоту $f = 2,3 \cdot 10^{14}$ Гц, соответствующую длине волны $\lambda = 1,3$ мкм).

Если провести аналогию между ВОЛС и линией связи по электрическому кабелю, то световоду соответствует одна пара проводников электрического кабеля.

Электрический сигнал после прохождения электронной части аппаратуры модулирует оптический сигнал для обеспечения возможности передачи его по оптическому кабелю. Оптический сигнал создается в оптическом передатчике, в качестве которого чаще всего используется светоизлучающий диод или полупроводниковый лазер. Исходный электрический сигнал либо непосредственно подается на излучатель, в результате чего осуществляется прямая модуляция мощности излучения электрическим сигналом, либо управляет работой внешнего модулятора, на вход которого от источника поступает непрерывное или импульсное излучение с постоянными параметрами. Для повышения эффективности ввода оптического сигнала в кабель (снижения потерь на вводе) включаются элементы согласования. Поступающий из кабеля оптический сигнал преобразуется в оптическом приемнике в электрический сигнал, который поступает для дальнейших преобразований в электронную схему.

Принципиальная структурная схема волоконно-оптической связи с ИКМ приведена на рис. 4.1. Основу составляет оптический кабель ОК, а также оптические передатчик и приемник в начале и конце системы соответственно. Передатчик выполняет также роль преобразователя электрического сигнала в оптический (ЭОП), а приемник обеспечивает обратное преобразование оптического сигнала в электрический (ОЭП).

Для преобразования кода и согласования элементов схемы применяются кодирующие устройства, а также оптические согласующие устройства (СУ). Преобразователь кода (ПК) формирует требуемую последовательность импульсов и осуществляет согласование уровней по мощности между электрическими (ИКМ) и оптическими элементами схемы. Передающие и приемные СУ формируют и согласовывают диаграммы направленности и апертуру между приемопередающими устройствами и кабелем.

Передаваемый ИКМ-сигнал через ПК поступает в ЭОП. Здесь он модулирует оптическую несущую и через передающее СУ поступает в ОК. На приеме оптический сигнал через приемное СУ поступает в ОЭП, где он преобразуется в электрический сигнал и через ПК поступает в приемник. Таким

образом, на передающей стороне от передатчика до ЭОП и на приемной стороне от ОЭП до приемника действует электрический сигнал, а от ЭОП до ОЭП по оптическому кабелю передается оптический сигнал.

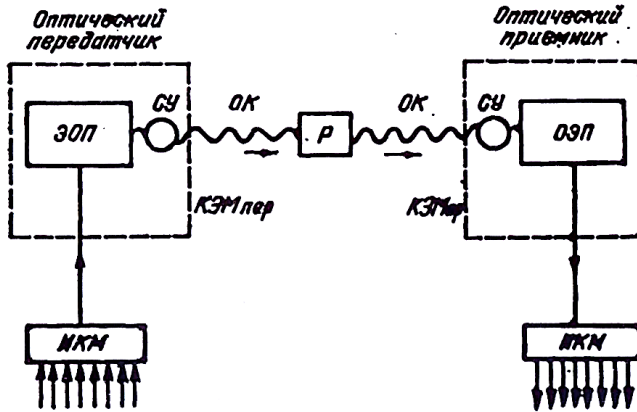


Рис. 4.1. Структурная схема волоконно-оптической передачи

В реальных условиях оказалось весьма целесообразным и практичным все элементы оптических передатчика и приемника изготавливать в виде компактного устройства – квантово-электронного модуля.

Через определенные расстояния (10...50 км), обусловленные дисперсией или затуханием кабеля, вдоль оптической линии располагаются линейные регенераторы (ЛР). В ЛР сигнал восстанавливается и усиливается до требуемого значения. Структурная схема ЛР приведена на рис. 4.2.

В регенераторе, содержащем два полукомплекта (отдельно для прямого и обратного направлений передачи), оптический сигнал преобразуется в электрический. В таком виде он регенерируется, усиливается и затем обратно преобразуется в оптический сигнал, который далее передается по ОК.

В настоящее время ЛР оптических систем строятся по схеме преобразования «свет-ток-свет», причем процесс регенерации осуществляется в электрической части с помощью электронного преобразователя. В принципе возможно применение чисто оптических регенераторов на основе оптических квантовых усилителей.

При выборе линейного сигнала (кода) учитываются помехоустойчивость кода и его технические преимущества. Помехоустойчивость оценивается минимальной средней мощностью сигнала на входе фотоприемника, которая обеспечивает заданное качество приема (например, вероятность ошибки) на фоне шумов фотодетектирования, лавинного умножения и теплового шума. Технические преимущества кода определяются высоким содержанием

информации о синхрочастоте (что упрощает устройства канала синхронизации), возможностью обнаружения ошибок в линейных и приемных регенераторах, простотой преобразователей кодов.

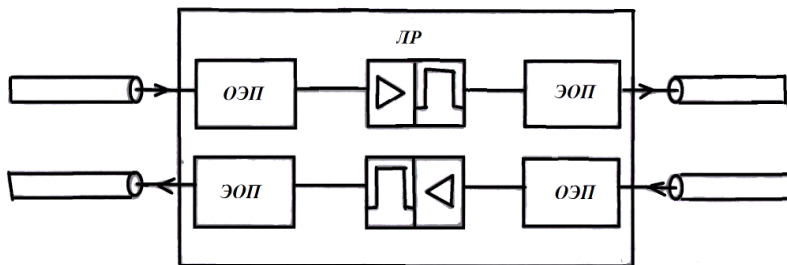


Рис. 4.2. Структурная схема линейного регенератора

Источники и приемники излучения должны быть взаимно согласованы с кабелем. Для этого необходимо, чтобы:

- длина волны излучения находилась в области малого затухания кабеля;
- диаграмма излучения источника соответствовала апертурному углу выбранного световода;
- фотоприемник имел достаточно высокую чувствительность;
- соблюдалась корреляция между скоростью передачи и шириной спектра излучения источника.

Следует иметь в виду, что в связи с сильно выраженными дисперсионными свойствами ОК приходящие на фотодетектор импульсы перекрываются. Оптимальный прием в этом случае имеет весьма сложный алгоритм. Для подавления межсимвольной интерференции применяют специальные фильтры (выравниватели), которые располагают после фотодетектора и усилителя. Последующую часть электрической схемы фотоприемника оптимизируют для приема импульсов без межсимвольной интерференции. Возможно также выравнивание по оптической частоте.

В настоящее время наиболее распространенной волоконно-оптической системой передачи является цифровая система ИКМ, в которой используется модуляция интенсивности по излучению. Система работает по двум оптическим волокнам, каждое из которых предназначено для передачи сигналов в одном направлении.

Весьма перспективно применение спектрального уплотнения, при котором в волоконный световод вводится одновременно излучение от нескольких источников, работающих на разных оптических частотах, а на приемном конце с помощью оптических фильтров происходит разделение сигналов. За счет спектрального уплотнения возможна передача значительно

большого объема информации по одному волоконному световоду и организация по нему двухсторонней связи.

Наряду с цифровыми системами передачи в волоконно-оптической связи находят некоторое применение и аналоговые системы передачи. Аналоговые системы используются в тех случаях, когда требуется организация широкополосных каналов (телевидение, видеотелефонирование и др.).

4.2. Дальность связи и длина регенерационного участка

Применительно к оптическим линиям связи с цифровыми системами передачи (ИКМ), у которых в регенераторах сигнал полностью восстанавливается и накопления помех не происходит, важно знать длину регенерационного участка. Общая дальность передачи может быть достаточно большой.

Длина регенерационного участка ВОЛС определяется энергетическим потенциалом аппаратуры и передаточными параметрами кабеля: его коэффициентом затухания α и дисперсией τ . Затухание приводит к ослаблению сигнала и уменьшению дальности передачи l_α . Дисперсия ограничивает пропускную способность световода $\Delta F \approx 1/\tau$, которая сказывается тем сильнее, чем длиннее линия ($l_{\Delta F}$).

Полоса пропускаемых частот ΔF и дальность передачи l связаны следующим соотношением:

$$\Delta F / \Delta F_x = l_x / l,$$

где значения с индексом x – искомые, а без x – заданные.

В длинных линиях (свыше 10 км), в которых процесс распространения волны уже установился, действует квадратичный закон соотношения между l и ΔF , т.е. $\Delta F / \Delta F_x = \sqrt{l_x / l}$ и $\Delta F_x = \Delta F \sqrt{l / l_x}$. Так, если кабельная промышленность поставляет кабель строительными длинами $l = 1$ км с полосой пропускания $\Delta F = 50$ МГц·км, то на участке линии длиной $l_x = 10$ км полоса пропускания существенно сузится и составит $\Delta F_x = \Delta F \sqrt{l_x} = 50 / \sqrt{10} = 15$ МГц.

Наивысшей пропускной способностью обладают одномодовые световоды. У них полоса пропускания достигает 0,5...1 ГГц·км.

Длина регенерационного участка выбирается по наименьшему значению l_α или $l_{\Delta F}$, но так, чтобы выполнялись требования по затуханию сигнала и полосе пропускания. С увеличением длины линии возрастает затухание цепи αl , которое не должно превышать энергетический потенциал системы $a_{\text{дон}}$, обычно составляющий 35...40 дБ. Одновременно с увеличением длины линии уменьшается пропускная способность световода. Здесь границей является требуемая полоса частот для используемой системы $\Delta F_{\text{дон}}$.

В общем виде ограничивающим фактором может быть как дисперсия, так и затухание. Применительно к передаточным характеристикам существующих оптических кабелей в многомодовых световодах длина регенерационного участка и соответственно дальность связи лимитируются дисперсией и соответственно полосой пропускания, а в одномодовых световодах, обладающих хорошими дисперсионными характеристиками, длина участка и дальность связи определяются затуханием световодного тракта.

4.3. Спектральное уплотнение ВОЛС

При создании магистральных линий связи на большое число каналов следует учитывать возможности, открываемые спектральным уплотнением (мультиплексированием) ОК. Сущность последнего состоит в том, что в волоконный световод вводится одновременно излучение от нескольких источников, работающих на разных длинах волн, а на приемном конце с помощью оптических фильтров происходит разделение сигналов. Спектральное уплотнение позволяет существенно увеличить пропускную способность оптических кабелей и организовать двустороннюю многоканальную связь по одному волокну. Возможность построения таких систем основывается на сравнительно слабой зависимости коэффициента затухания ОК в пределах используемого спектрального диапазона от частоты (или длины волны) оптической несущей. Поэтому по одному волоконному световоду, подобно многоствольным радиорелейным системам передачи, можно организовать несколько широкополосных оптических каналов, увеличив тем самым результирующую скорость передачи информации. Это позволяет обойти ограничение на скорость передачи по одному волоконному световоду, связанное с дисперсионными искажениями. На рис. 4.3 показана структурная схема системы передачи со спектральным уплотнением оптических каналов. На передающей стороне системы имеется n оптических передатчиков (ОП), излучающих оптические несущие с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. С помощью устройства объединения (УО) осуществляется ввод различных оптических несущих в один волоконный световод (ВС) ОК. На приемной стороне в устройстве разделения (УР) оптические несущие разделяются в пространстве и поступают на фотоприемники (ФП). Таким образом, по одному световоду организуется n спектрально разделенных оптических каналов.

Для объединения и разделения оптических несущих могут использоваться различные оптические спектральные устройства (мультиплексоры), работа которых основана на известных явлениях физической оптики: дисперсии, дифракции, интерференции. В качестве примера на рис. 4.4 показана схема призматического устройства, с помощью которого можно как объединить, так и разделить оптические несущие. Основным элементом такого устройства является *оптическая призма*, в

которой за счет дисперсии, т.е. зависимости показателя преломления от длины волны оптического излучения, происходит пространственное разделение (или объединение для обратного направления) оптических несущих. Для примера здесь показано два оптических канала с длинами волн несущих λ_1 и λ_2 . Торцевой ВС, по которому передается оптическое излучение двух каналов, располагается в фокальной плоскости линзы L_1 . Поэтому расходящийся пучок излучения с торца ВС преобразуется линзой в параллельный пучок и падает на призму. Так как излучение разной длины волны отклоняется призмой на разные углы, то из призмы выходят параллельные пучки разного направления (штриховые линии). С помощью второй фокусирующей линзы L_2 эти пучки собираются в различных точках ее фокальной плоскости и далее поступают в волоконные световоды ВС₁ и ВС₂. На концах световодов ВС₁ и ВС₂ располагаются фотоприемники при работе устройства в режиме разделения или оптические передатчики при объединении несущих с длинами волн λ_1 и λ_2 .

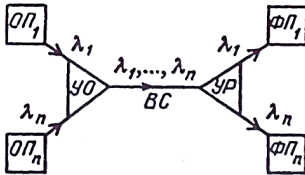


Рис. 4.3. Принципиальная схема спектрального уплотнения

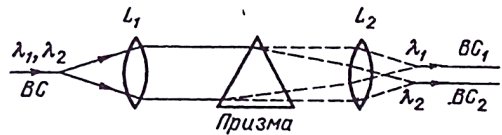


Рис. 4.4. Призматическое устройство разделения оптических несущих

Призматические устройства объединения и разделения оптических несущих обладают рядом недостатков, из которых следует выделить большие габариты, значительные вносимые потери и высокую стоимость. Для создания систем передачи со спектральным разделением оптических каналов более подходят устройства, работающие на дифракционных и интерференционных явлениях. Сюда относятся дифракционные решетки, светофильтры и др.

В *дифракционных решетках* (рис. 4.5) различные оптические волны отклоняются на различные углы и таким образом осуществляется разъединение или объединение несущих.

Широкое применение получили оптические фильтры. Действие их основано на дисперсионных свойствах кварцевого стекла, т.е. зависимости показателя преломления от длины волны $n = \psi(\lambda)$. Соответственно при прохождении различных волн через световод с меняющимся значением n они испытывают отражения под различными углами $\varphi_\lambda = \psi(n)$.

Известно несколько модификаций оптических фильтров. *Волоконный фильтр* представляет собой отрезок световода, параметры сердцевинки или

оболочки которого (показатель преломления, диаметр) периодически модулированы вдоль оси световода. Такие световоды обладают резко выраженными селективными свойствами: одни волны испытывают отражение, а для других волн фильтр прозрачен (рис. 4.6 а, б). *Плоские конструкции фильтров* выполнены в виде комбинации стекол с различными показателями преломления. При прохождении через такой фильтр волны отражаются под различными углами (рис. 4.6 в). *Оптические фильтры* обеспечивают коэффициент отражения по интенсивности примерно 0,9.

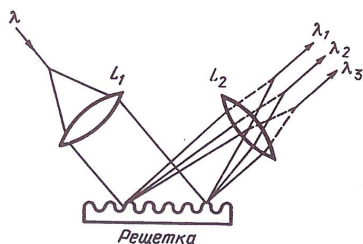


Рис. 4.5. Разделение оптических несущих с помощью дифракционной решетки

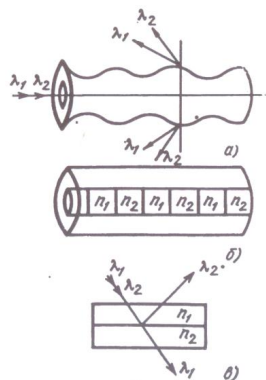


Рис. 4.6. Оптические фильтры:
а - модуляция диаметра волокна;
б - модуляция показателя преломления;
в - плоская конструкция фильтра

В заключение можно отметить, что спектральное уплотнение открывает широкие возможности увеличения мощности оптических трактов и развития сетей связи. Достоинствами его являются:

- повышение пропускной способности ОК;
- возможность организации двусторонней связи по одному ВС;
- наращивание мощности приложенных оптических линий связи;
- осуществление передачи различных видов информации на различных несущих волнах в абонентских интегральных сетях связи многоцелевого назначения.

5. Проектирование волоконно-оптических линий связи

5.1. Требования к ВОЛС

Проектирование систем волоконно-оптической связи следует начинать с определения предъявляемых к системе требований, что определит в дальнейшем сам процесс проектирования, техническую эффективность и экономическую целесообразность принятых решений. К общим требованиям к системам следует отнести:

заданный объем передаваемой информации. Это требование характеризуется необходимой полосой пропускания системы, скоростью передачи информации, числом эквивалентных стандартных каналов тональной частоты;

- тип передаваемой информации: цифровой или аналоговый;
- помехозащищенность системы. Это требование задается отношением сигнал-шум на входе оптического приемника либо вероятностью ошибки при передаче цифровой информации;
- расстояние между оконечными устройствами или терминалами, количество и характеристики терминалов;
- условия прокладки (строительства) и эксплуатации системы;
- требования к массо-габаритным и стоимостным характеристикам, надежности систем.

Кроме этих основных требований при проектировании необходимо учитывать воздействие на системы таких внешних факторов, как физический и химический состав окружающей среды, наличие электромагнитных и радиационных воздействий и т.д. Учет совокупности всех перечисленных факторов делает процесс проектирования ВОЛС довольно сложным, допускающим получение неоднозначного решения, когда выбор окончательного варианта определится конкретными условиями применения.

5.2. Выбор топологии сети

Волоконно-оптические линии связи могут обеспечивать связь между двумя оконечными пунктами при ответвлении части передаваемой информации и вводе дополнительной информации в пунктах регенерации точно так же, как это делается в системах связи на металлических кабелях. Подобное построение ВОЛС называется цепочечным и применяется в основном в системах связи городских телефонных сетей (для связи между АТС) и междугородной связи. В таких системах ОК вместе с передающим и приемным квантово-электронными модулями включается вместо металлического кабеля в типовые системы связи.

Волоконно-оптические линии связи можно использовать для распределения информации между значительным числом оконечных устройств,

которые в этом случае связываются в многонаправленную систему распределения данных, где ответвление и ввод информации производятся в оптическом диапазоне. В такой системе может передаваться множество мультимплексных сигналов к ряду оконечных устройств. Такие схемы могут использоваться в системах кабельного телевидения, в различных бортовых системах, для внутриобъектовой и производственной связи, в вычислительных комплексах, в локальных абонентных сетях и т.д.

Некоторые виды оптических распределительных систем с оконечными устройствами (терминалами или узлами) показаны на рис. 5.1. Другие возможные типы топологий оптических систем получаются путем комбинации приведенных на рисунках схем.

В сети конфигурации типа «звезда» (рис. 5.1 а) оконечные устройства соединены между собой через оптический разветвитель энергии типа «звезда» или подключены к узлу коммутации (УК), который осуществляет необходимое распределение сообщений. В кольцевой системе (рис. 5.1 б) абоненты включены с помощью Т-образных оптических ответвителей последовательно в замкнутое кольцо, из которого абонент извлекает предназначенную ему информацию и в которое он вводит свои собственные сигналы. В кольцо указанной системы может быть включен УК, показанный на рис. 5.1,б штриховой линией. К указанному УК может подключаться несколько кольцевых сетей. При наличии в указанной топологической схеме УК, осуществляющего ввод, вывод и обмен информации в системе, система называется «активным» кольцом, а при отсутствии УК – «пассивным». Последовательная топология (рис. 5.1 г) является как бы разомкнутой кольцевой системой, так как превращается в нее при обрыве ОК в кольцевой системе. Одно из N оконечных устройств может быть узлом коммутации. Сеть конфигурации типа «дерево» (рис. 6.1 в) используется обычно в локальных абонентских сетях и системах кабельного телевидения. Это системы распределения данных от УК или источника информации по постепенно ветвящейся структуре к N оконечным устройствам. Деление оптической энергии происходит с помощью волоконных или интегрально-оптических разветвителей энергии (РЭ) и Т-образных ответвителей.

Для экономии ОК часто используют топологию сети типа «звезда» с децентрализованной коммутацией (рис 5.1 д). Здесь оконечные устройства соединяются с УК через вспомогательный узел коммутации (ВУК), а не непосредственно, что приводит к экономии кабеля.

Одним из главных требований, предъявляемых к структуре сети, является ее максимальная надежность, т.е. обеспечение возможности функционирования сети в полном объеме или частично при выходе из строя узлов или соединяющих узлы каналов связи. Простейшие топологии, например «звезда» или одинарное «кольцо», этому требованию не удовлетворяют, так как выход из строя центрального узла в первом случае или одного из узлов или же

каналов связи во втором случае полностью нарушает работу сети. Лучшей надежностью обладают сети с более сложной топологией: с дублированием каналов связи и переключением их в случае нарушений. Наибольшая степень резервирования может быть достигнута в полносвязной сети (рис. 5.1 е), в которой каждый узел сети связан с каждым. Однако такое решение слишком сложно и неэкономично, поэтому более реальны различные компромиссные варианты топологии.

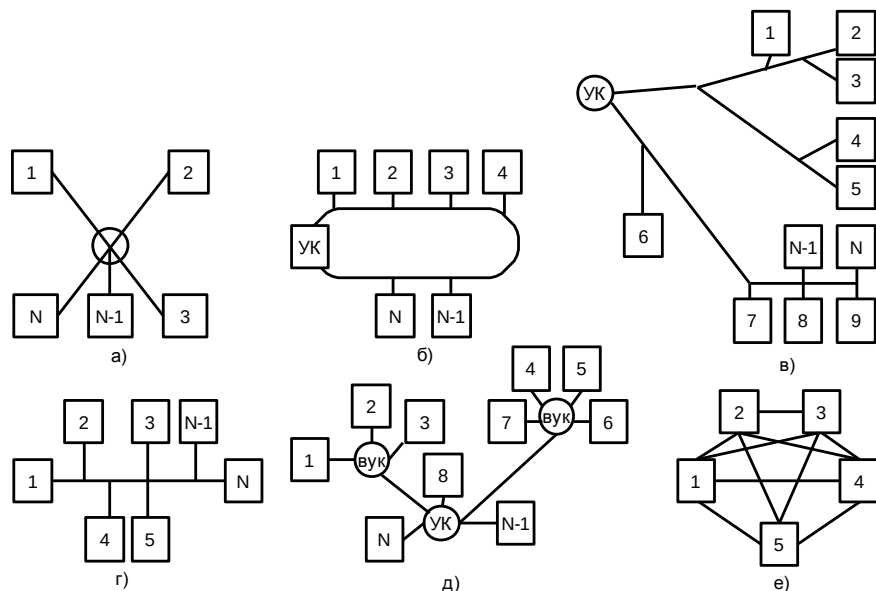


Рис. 5.1. Основные типы топологии сетей

В качестве примера анализа различных схем построения сетей проведем количественную оценку параметров последовательной и звездообразной топологий ВОЛС. При последовательной распределительной системе с постоянными коэффициентами ответвления и потерями в Т-образных ответвителях наибольшие возможные потери будут между окончательными устройствами (или узлами) с номерами 1 и N-1. Эти суммарные потери P_{II} (дБ) в последовательной системе, исключая потери в самом ОК, представлены выражением

$$P_{II} = (2L_c + L_{ci} + L_{it})(N-3) + (2L_c + L_{ci} + L_t) + L_s,$$

где L_c – потери в кабельном разьеме, подключаемом к ответвляющему Т-образному соединению на каждом из трех входов (0.5...1.5 дБ); L_{ci} – собственные потери Т-ответвителя (1...2 дБ); L_{it} – вносимые потери, связанные с мощностью, ответвляемой в Т-ответвителе, и определяемые конструкцией

ответвителя; L_t – коэффициент ответвления Т-ответвителя (обычно около 10 дБ); L_s – потери в двунаправленном соединителе (ответвителе) на входе оконечного устройства, обеспечивающем возможность работы в двух направлениях (3дБ).

Суммарные потери в звездообразной распределительной сети с соединителем типа «звезда» без учета потерь в ОК не зависят от того, какая из пар оконечных устройств рассматривается, и определяются соотношением

$$P_3 = 4L_c + L_{ck} + L_s + L_{sc},$$

где L_{ck} – внутренние потери в соединителе типа «звезда» (обычно 6...9 дБ); L_{sc} – вносимые потери за счет разветвления сигнала звездообразным разветвителем ($10 \cdot \lg N$, дБ).

Для приведенных выше типовых значений потерь выражения для суммарных потерь в распределительных системах можно аппроксимировать следующими выражениями, дБ:

$$P_{II} = 4,5N + 3,5 \text{ для последовательной сети,}$$

$$P_3 = 10 \cdot \lg N + 13 \text{ для звездообразной сети.}$$

При $N \leq 5$ суммарные потери в обеих распределительных системах примерно одинаковы и не превышают 20 дБ. Для большего числа терминалов различие между рассмотренными системами быстро растет. Для $N=10$ получаем $P_{II}=48$ дБ, а $P_3=23$ дБ. Из приведенных результатов видно, что звездообразная распределительная сеть (без учета потерь в кабеле) обладает существенными преимуществами перед последовательной при большом числе терминалов ($N \geq 10$). Недостатком последовательной системы распределения информации является также то, что приемники должны иметь автоматическую регулировку усиления с большим динамическим диапазоном для эффективного приема сильных сигналов от близко расположенных терминалов и слабых сигналов от удаленных терминалов. В звездообразной распределительной системе в ответвителе типа «звезда» оптическая мощность распределяется между всеми терминалами поровну, что приводит к зависимости уровня сигнала только от расстояния до терминала. Если расстояние от ответвителя до всех оптических приемников одинаковы, то сигналы во всех ветвях системы одинаковы, что упрощает конструкцию оптических приемников, делает одинаковым качество связи со всеми терминалами.

При выборе топологии сетей необходимо также учитывать число оконечных устройств (ОУ) и устройств обработки информации (УОИ); территориальное расположение ОУ и УОИ; функциональное назначение и показатели качества сети; надежность сети; стоимость сооружения сети; условия эксплуатации; требование к массе и габаритным размерам элементов сети.

Подключение ОУ и УОИ к сети возможно тремя способами: активным через оптоэлектронные преобразователи, пассивным и комбинационным. На рис. 5.2 поясняется способ активного подключения ОУ к сети, причем для

повышения надежности в этой сети предусмотрено два кольца. Оптический приемник и передатчик в данном случае выполняют роль регистратора, поэтому при выходе их из строя прерывается передача в данной магистральной. Использование же резервной магистрали приводит к увеличению стоимости сети. В связи с этим находит применение комбинационный способ подключения.

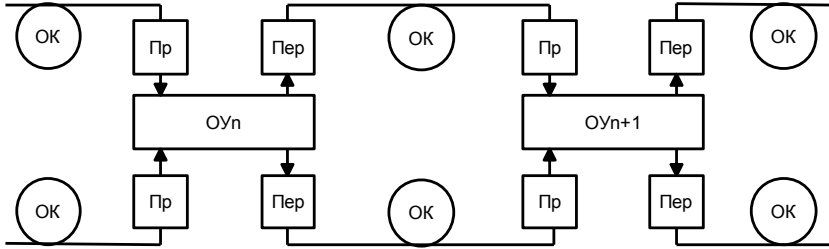


Рис. 5.2. Пример активного подключения ОУ к сети с топологией магистрали или кольца (Пр – оптический приемник, Пер – оптический передатчик)

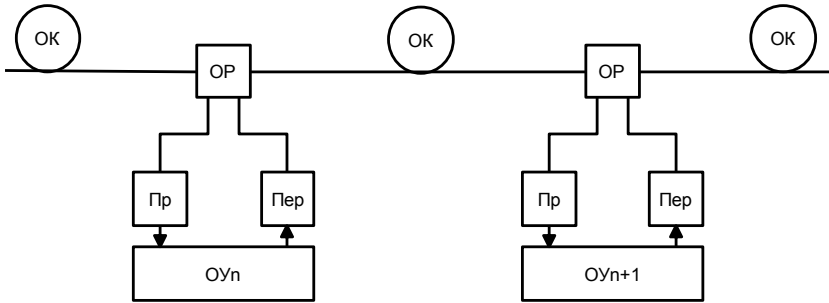


Рис. 5.3. Пример комбинированного подключения ОУ к сети с топологией магистрали или кольца (ОР – оптический разветвитель)

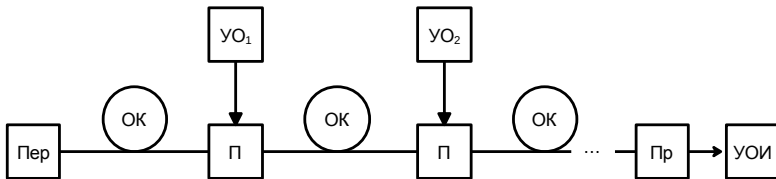


Рис. 5.4. Пассивное подключение ОУ к сети с топологией магистрали (П – образователь волоконно-оптического датчика либо ОУ)

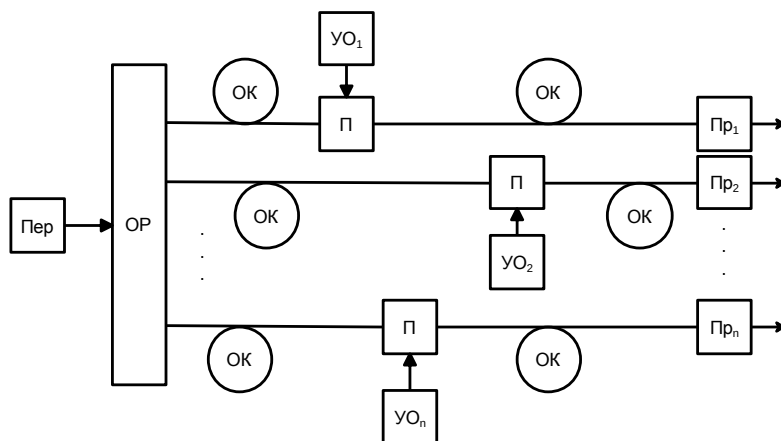


Рис. 5.5. Пассивное подключение ОУ к сети с топологией звезда

На рис. 5.3 показан комбинированный способ подключения ОУ к сети с топологией типа «шина» или «кольцо».

Комбинированный и активный способы подключения ОУ к сети предполагают наличие на каждом ОУ оптических приемников или передатчиков, что существенно увеличивает стоимость ВОЛС. Уменьшение числа оптических приемников и передатчиков возможно при переходе к пассивному (без оптоэлектронного преобразования) подключению ОУ к сети. Однако в этом случае ОУ представляет собой либо волоконно-оптический датчик, либо в ОУ должно быть устройство, позволяющее модулировать параметры излучения, распространяющегося по оптическому тракту. Таким образом, в волоконно-оптической сети с пассивным подключением ОУ к оптическому тракту преобразователь волоконно-оптического датчика или ОУ является элементом оптического тракта (рис. 5.4).

Для сети с топологией «звезда» основные варианты пассивного подключения ОУ имеют вид, изображенный на рис. 5.5.

5.3. Выбор волоконно-оптических систем передачи и кабелей

Волоконно-оптические системы передачи. При проектировании трактов оптической связи необходимо в первую очередь принять оптимальные решения по выбору волоконно-оптической системы передачи, типу ОК и вопросу энергообеспечения магистрали.

Оптические кабели связи. Изготавливаемые у нас ОК содержат 4, 8, 16 волокон. Волокна классифицируются на ступенчатые, градиентные и одномодовые и используются на длинах волн 0,85; 1,3 и 1,55 мкм. Кабели могут

изготавливаться с металлическими элементами (оболочки, оплетки, армирующие стержни) и без них.

Достоинствами ОК без металлических элементов являются существенно меньшие габаритные размеры и масса. Кабели не подвержены грозовым и импульсным воздействиям, свободны от промышленных помех. Однако возникают трудности в отыскании трассы прокладки кабеля и нет возможности организовать дистанционное электропитание регенерационных пунктов.

Оценивая различные конструкции ОК применительно к различным звеньям сети связи, можно рекомендовать:

1. На линиях магистральной связи использовать кабели с одномодовыми волокнами. На волне 1,55 мкм они обеспечивают большие дальности и число каналов. Эти кабели, предназначенные для подземной прокладки, чаще всего изготавливаются с металлическими элементами.

2. На линиях зонной связи протяженностью сотни километров целесообразно применение градиентных волокон – работа на волне 1,3 мкм. Зонный кабель прокладывается непосредственно в грунт, поэтому с целью защиты от атмосферного электричества и грызунов он имеет металлический покров (оболочку, бронеленты).

3. На ГТС применяются оптические кабели со ступенчатым волокном. На волне 0,85 мкм они обеспечивают требуемые дальности и нужное число каналов. Так как городские кабели прокладываются в телефонной канализации, то они могут изготавливаться в пластмассовой оболочке, без металла.

Электропитание ВОЛС. В настоящее время получили развитие 2 варианта электропитания необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП): дистанционно по металлическим элементам, находящимся в ОК, и от автономных электроустановок. В качестве металлических элементов могут использоваться токопроводящие жилы, металлические стержни, а также металлические оболочки.

Для питания НРП наибольшее применение получили теплоэлектрогенераторы (ТЭГИ) и радиоизотопные генераторы (РИТЭГИ). Кроме того, широко используется электросеть, расположенная по трассе прокладки кабеля. Известно также применение ветро- и солнечных генераторов.

Сравнивая указанные два способа электропитания НРП, можно отметить, что электропитание от автономных электроустановок выгодно в технико-экономическом отношении лишь при больших длинах регенерационных участков, а при малых длинах эффективней системы дистанционного электропитания. Границей раздела между ними является примерно $l_p = 20 \dots 30$ км.

Применительно к различным звеньям сети связи можно рекомендовать:

– на магистральной сети, имеющей $l_p = 50 \dots 70$ км, применять автономные электроустановки, лучше РИТЭГИ;

– на зоновой сети, где регенерационные пункты располагаются довольно часто ($l_p=30$ км), следует применять дистанционное питание. Для этой цели в зоновом кабеле предназначены медные жилы;

– на ГТС и чаще всего СТС требуемые дальности связи обеспечиваются без применения НРП. При появлении НРП их можно питать от местной электросети, расположенной на трассе прокладки кабеля.

Широкое развитие получают так называемые абонентские ВОЛС, предназначенные для передачи информации от узлов связи к абонентам, территориально расположенным на расстоянии от этих узлов, не превышающем несколько километров. Такие ВОЛС в перспективе кроме традиционных телефонных, телеграфных сообщений и программ проводного вещания позволяют обеспечить, например, следующие информационные услуги: скоростную передачу факсимильной информации; видеотелефон; кабельное телевидение и передачу факсимильных изображений; дистанционную передачу печатных текстов и контроль документов, быстрый дистанционный доступ к системам памяти большой емкости (библиотекам, справочно-информационным службам, вычислительным центрам и др.). В этих системах в перспективе предполагается наличие оконечных абонентских устройств, включающих в свой состав телефон, устройство индикации изображения, клавиатуру и программируемый терминал, позволяющий обрабатывать различную информацию.

5.4. Методика инженерного расчета ВОЛС

Инженерный расчет ВОЛС проводится в следующей последовательности поэтапно:

- 1) выбор системы передачи и определение полосы частот или скорости передачи;
- 2) выбор типа и конструкции ОК;
- 3) выбор источника излучения, определение его параметров;
- 4) выбор фотоприемника, определение его параметров;
- 5) определение энергетической характеристики системы;
- 6) расчет потерь в линейном тракте;
- 7) расчет запаса мощности сигнала;
- 8) определение энергетического запаса системы;
- 9) расчет быстродействия системы;
- 10) анализ системы.

На первом этапе расчета уточняют и анализируют данные технического задания. Определяют скорость передачи информации (для цифровых систем) или передаваемую полосу частот (для аналоговых систем) и выбирают систему передачи, обеспечивающую получение требуемых числа каналов и дальности связи. Затем анализируют сигналы, передаваемые по ВОЛС. В цифровых

системах выбирают наиболее оптимальный код, а в аналоговых – способ модуляции. Выбирают топологию схемы распределения данных, подсчитывают необходимое число оконечных устройств.

На втором этапе осуществляется выбор ОК, наиболее полно удовлетворяющего требованиям системы по своим физико-механическим, массо-габаритным и стоимостным характеристикам. Определяют его технические и оптические характеристики. Фактически выбор кабеля можно отложить до окончания расчета, задавшись некоторыми значениями затухания и дисперсии в световодах, свойственными имеющимся в наличии кабелям, и позднее определить, удовлетворяют ли данные значения требованиям системы. Однако на данном этапе внедрения ВОЛС набор имеющихся в распоряжении разработчика типов ОК относительно невелик и его выбор можно выполнить.

Третьим этапом расчета является выбор источника излучения. В случае использования способа кодирования с невозвращением в нуль из взятой в паспортных данных источника средней выходной мощности $P_{\text{ср}}$ (по уровню) вычитаем 3дБм, а при коде с возвращением в нуль 6дБм, что обусловлено уменьшением средней излучаемой мощности кодированного сигнала по сравнению с непрерывным режимом. Для других типов кодов $P_{\text{ср}}$ уменьшается пропорционально увеличению полосы частот сигнала.

Для увеличения срока службы излучателей, уменьшают его пиковую мощность, что снижает эксплуатационные расходы и повышает надежность системы (так как работа излучателя при повышенных токах накачки ускоряет процесс его деградации). В расчетах это учитывается вычитанием 3дБм из величины $P_{\text{ср}}$.

После установления необходимого значения оптической мощности в приемнике можно рассчитать полный запас по мощности оптического сигнала в линии, т.е. определить энергетическую характеристику системы (пятый этап).

Три следующих этапа расчета связаны с энергетическими расчетами. Вначале определяют потери в ВС. Если система имеет топологию, то следует учитывать потери α_N во всех участках ОК. Указанные значения определяются коэффициентом затухания кабеля α . Учитываются также потери при вводе излучения оптического источника в ВС, которые можно взять в справочных данных или найти путем экспериментов или расчетом. Эти потери часто являются основным фактором при решении вопроса об использовании в кабелях оптических жгутов или волокон, выборе NA световода, особенно в коротких ВОЛС, где применяются светодиоды. Потери в соединениях кабеля с фотодетектором можно также найти в справочных данных или путем экспериментов и расчета.

Затем следует определить потери в кабельных разъемах и соединениях. Поскольку неразъемные соединения имеют меньшие потери, габаритные размеры и более высокую надежность, чем разъемные, в ВОЛС, как правило, стараются сократить число разъемных соединений.

В практически используемых ВОЛС в зависимости от условий их эксплуатации должен быть предусмотрен определенный допуск изменений параметров системы при изменениях температуры окружающей среды.

После проведенных расчетов можно определить суммарное затухание в системе, просуммировав все описанные ранее потери. Энергетический запас системы определяют как разность между полным запасом мощности и суммарным затуханием. Значение энергетического запаса работоспособной системы должно быть положительным.

После удовлетворения требований относительно уровня оптической мощности в системе необходимо рассчитать быстродействие системы, чтобы определить, смогут ли выбранные компоненты ВОЛС обеспечить требуемую скорость передачи или полосу пропускания сигнала. Для этого вначале находят полное допустимое время нарастания сигнала в системе. Исходя из следующих норм: 0,7 бит/с – без возвращения в нуль и 0,35 бит/с – с возвращением в нуль.

После определения допустимой дисперсии системы необходимо установить быстродействие источника и фотодетектора или приемного модуля по справочным данным или паспортам имеющихся в наличии элементов ВОЛС. Затем для выбранного типа световода, зная рабочую длину излучателя λ_0 и ширину спектра его излучения σ_λ , производят расчет быстродействия, обусловленного межмодовой, материальной и волноводной дисперсиями. При выбранной элементной базе определяют допустимое быстродействие системы. После этого с учетом запаса на неточность паспортных данных элементов ВОЛС и параметров ВС рассчитывают реальное быстродействие всей системы. Полученное значение сравнивают с допустимым быстродействием системы.

Если при имеющемся парке элементов необходимое быстродействие получить не удастся, следует ввести в систему ретрансляторы, что позволит сократить длину ретрансляционного участка l_p .

После расчета системы осуществляется анализ системы, определяются основные факторы, накладывающие ограничения на систему. Следует отметить, что величина l_p ограничивается либо энергетическим запасом, либо временными параметрами (быстродействие) системы. В первом случае можно ослабить требования к быстродействию излучателей и приемников, а также к дисперсии в световодах; во втором случае можно ослабить требования к чувствительности приемника, мощности, излучаемой источником, типу передаваемого сигнала (например, выбору кода), потерям в кабеле и разъемах. Указанные снижения требований позволят изменить элементную базу ВОЛС в сторону ее упрощения и снизить стоимость системы.

5.5. Определение длин регенерационных участков

Весьма важным разделом проекта является определение длин регенерационных участков ВОЛС. Желательно, чтобы l_p была максимальной, так как это экономично и обеспечивает лучшее количество передачи информации. Величина l_p в основном определяется двумя факторами: потерями и дисперсией в оптическом кабеле. Наиболее перспективными в этом отношении являются системы с одномодовыми ВС и $\lambda=1,3\dots1,6$ мкм, которые при малых потерях (менее 1дБ/км) позволяют получить высокую информационную емкость. В этом диапазоне длин волн пропускная способность ВС может быть увеличена компенсацией отрицательной материальной дисперсии световода с помощью положительно волноводной дисперсии в широком диапазоне длин волн ($\Delta\lambda=1,3\dots1,5$ мкм). Кроме того, использование диапазона $\lambda\geq 1,3$ мкм по сравнению с $\lambda=0,8\dots0,9$ мкм дает возможность изготовить ВС с большим диаметром сердцевины, что упрощает их практическое использование.

При высоких скоростях передачи (более 100 Мбит/с) в одномодовом ВС ограничение l_p происходит за счет шумов разделения мод лазера. Интенсивность каждой продольной моды лазера флуктуирует в процессе высокоскоростной двоичной модуляции, хотя полная интенсивность при этом остается постоянной. Эти флуктуации вызывают изменение формы каждого импульса после передачи по длинному световоду. Изменения связаны с различными искажениями одновременно излучаемых продольных мод, обусловленных хроматической дисперсией световода. Такая флуктуация формы оптического сигнала и называется шумом разделения мод (рис. 5.6). Этот шум ограничивает расстояние между ретрансляторами в ВОЛС. Если допустимое уменьшение отношения С/Ш, обусловленное шумом разделения мод, составляет 2 дБ, то максимально возможное произведение скорости передачи информации на длину линии можно оценить с помощью соотношения $\Delta F l_p = 3,5 \cdot 10^5 / (m \sigma_\lambda)$, Мбит·с⁻¹·км, где ΔF – скорость передачи, Мбит/с; l_p – расстояние между ретрансляторами, км; m – хроматическая дисперсия волокна, пс/(км·нм); σ_λ – ширина спектра излучения лазера по уровню половинной мощности, нм.

Если уширение импульсов за счет дисперсии в световоде и расширения спектра излучения лазера вызывает уменьшение отношения С/Ш на 3дБ, то широкополосность системы $\Delta F l_p = 8 \cdot 10^5 / (m \sigma_\lambda)$, Мбит·с⁻¹·км.

Как видно из приведенных соотношений, для реализации линий передачи со значительным расстоянием между ретрансляторами необходимо использовать лазеры, генерирующие на одной продольной или поперечной моде. При одномодовых лазерах ограничение дальности связи может происходить за счет скачкообразного изменения длины волны генерируемой моды при изменении тока и температуры или за счет возникновения

многомодового спектра генерации при высокоскоростной модуляции. Решением указанной задачи является использование динамически одномодовых лазеров. При отсутствии одномодового лазера для передачи сигналов на большие расстояния с высокой скоростью можно использовать световоды с малой хроматической дисперсией (например $\Delta\lambda=1,3$ и $1,5$ мкм) и спектральным уплотнением каналов. Из экспериментов, проведенных над когерентными оптическими системами, видно, что можно уменьшить требуемый уровень принимаемого оптического сигнала на $10...20$ дБ.

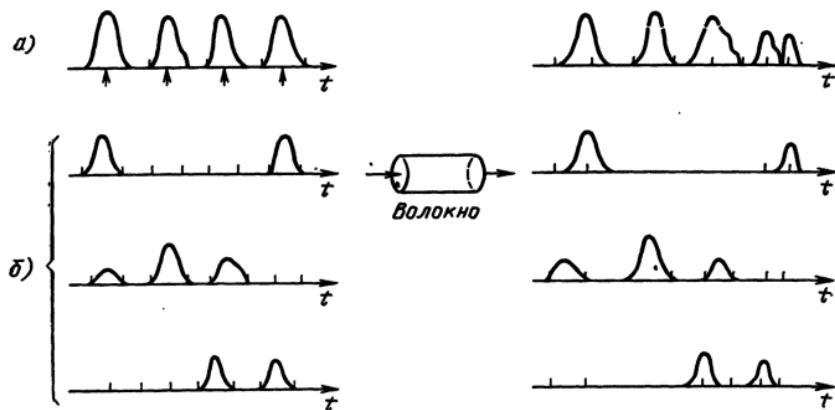


Рис. 5.6. Иллюстрация шумов разделения мод лазера: а – полная оптическая мощность лазера; б – распределение оптической мощности лазера по трем излучаемым им модам

В одномодовых световодах при больших скоростях передачи (выше 100Мбит/с) ограничение I_p происходит из-за модовой дисперсии. В системах с широкополосными излучателями (СД) существенное значение имеет также хроматическая дисперсия. В настоящее время более предпочтительными являются градиентные многомодовые ВС, поскольку в них по сравнению с волокнами со ступенчатым ППП ниже модовая дисперсия. Дисперсия мод в градиентном ВС зависит от ППП. Для изготовления широкополосных многомодовых градиентных ВС с малыми потерями необходимо подбирать оптимальные параметры профиля.

Оценить широкополосность волоконно-оптического тракта с многомодовым ВС можно с помощью соотношения $\Delta F_1 = \Delta F L^{-\gamma}$, $\text{Мбит} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}$, где ΔF – широкополосность оптического световода, Мбит/с ; L – длина световода, км; γ – показатель степени, характеризующий зависимость ширины полосы от длины световода и лежащий в пределах $0,5...1$.

Работы по определению пределов информационной емкости ВОЛС показали, что чувствительность приемника в системах связи с приемниками

прямого усиления может достигнуть 80 дБм при скорости передачи информации в несколько сотен мегабит в секунду. Применение одномодовых ОК с потерями 0,1дБ/км и лазерных источников мощностью несколько десятков милливатт позволит размещать ретрансляторы через 450...500 км.

5.6. Выбор сигналов цифрового линейного тракта

Вид сигналов в линейном тракте ВОЛС выбирают с учетом особенностей оптических элементов. Шумовой характер излучения источников света ограничивает используемые виды модуляции излучателей. В практически используемых системах применяется модуляция по интенсивности. Однако развитие технологии компонентов ВОЛС обусловило перспективность применения и когерентных систем связи. Когерентные ВОЛС, основанные на модуляции параметров несущей оптической волны, а не интенсивности света, позволяют максимально реализовать преимущества оптической связи. В таких системах используют модуляцию/демодуляцию оптической несущей, оптический гетеродинный прием с оптическим предусилением, оптическое усиление. Передающей средой ВОЛС является одномодовый световод, предпочтительно с одной поляризацией излучения. Особые требования накладываются и на источник излучения – одномодовые полупроводниковые лазеры, ширина спектра излучения которых должна быть очень мала и стабильна.

Основные преимущества когерентной волоконно-оптической системы связи можно свести к следующему:

1. Выигрыш по чувствительности по сравнению с наиболее широко используемыми ВОЛС, в которых применяются модуляция интенсивности излучения оптического источника и прямое детектирование оптического сигнала, составляет 12...20 дБ и зависит от схемы модуляции-демодуляции и параметров фотодетекторов. Это позволяет довести длины регенерационных участков линии связи до 100...200 км

2. Возможность использования вместо ретрансляторов полупроводниковых оптических усилителей и световодов с потерями менее 1 дБ/км позволяет организовать линии связи длиной до 10^4 км с расстояниями между оптическими усилителями 40...60 км.

3. Чрезвычайная узкополосность лазерных излучателей, присущая когерентным методам связи, снимает ограничения на длину линии связи, накладываемые материальной дисперсией световода. Единственным параметром, ограничивающим длину линии, остаются потери в линейном тракте.

4. Возможность использования когерентной модуляции – фазовой и частотной с известными из радиотехники преимуществами этих видов модуляции.

5. Уплотнение по оптической частоте с очень точным разделением несущих в приемнике.

В современных ВОЛС используются цифровые сигналы, которые модулируют оптическое излучение источников. В настоящее время для передачи цифровой информации используют почти исключительно системы с ИКМ. Последняя характеризуется высокой помехоустойчивостью и слабым накоплением шумов. Кроме того, оптические системы с ИКМ легко сопрягаются с существующими цифровыми сетями передачи информации. При выборе линейного сигнала (кода) ИКМ систем приходится учитывать две категории факторов:

1) высокую помехоустойчивость кода, которая определяет минимальную среднюю мощность сигнала в линии, обеспечивающую заданное качество приема на фоне принципиально неустраняемых шумов (фотодетектирования, лавинного умножения в ФД) при условии идеально работающей аппаратуры (идеальной синхронизации, отсутствии флуктуации порога в решающем устройстве цифрового приемника, температурной стабильности параметров элементов ВОЛС и т.д.);

2) технические преимущества кода, к которым относятся: возможно низкая скорость передачи в линии, что упрощает требования к электронным компонентам системы и ее широкополосности; простота кодера и декодера, т.е. преобразователей сигналов оконечной аппаратуры к сигналам линейного тракта и обратно; высокое содержание информации о синхрочастоте, что упрощает систему синхронизации; минимальное содержание в коде низкочастотных компонент, что снижает флуктуации уровней; возможность обнаружения ошибок.

6. Прокладка оптических кабелей

При строительстве ВОЛС, как и при строительстве обычных линий связи, выполняются следующие работы: разбивка линии, доставка кабеля и материалов на трассу, испытание, прокладка, монтаж кабеля и устройство вводов. При прокладке кабеля в пределах города сооружается кабельная канализация, в полевых условиях кабель кладется непосредственно в землю на глубину 1,2 метра. Однако в организации и технологии строительства ВОЛС по сравнению с работами на традиционных кабелях имеются существенные отличия. Эти отличия обусловлены в первую очередь своеобразием конструкций ОК, которые заключаются в следующем:

- критичность к растягивающим усилиям, малые поперечные размеры и масса ОК;
- большие строительные длины ОК;
- сравнительно большие величины затухания сростков волокон;

- невозможность содержания ОК под воздушным давлением;
- трудности организации служебной связи при строительстве ВОЛС с ОК без металлических элементов;
- недостаточное развитие методов и средств для измерений и отыскания мест повреждений на ОК.

При работе с ОК без металлических оболочек надо иметь в виду, что они имеют сравнительно малую механическую прочность на разрыв и особенно уязвимы относительно радиального давления. Поэтому при прокладке ОК следует соблюдать особую осторожность, так как мощное кабелеукладочное оборудование в процессе движения может повредить стекловолоконно. Особенно вредно сказываются динамические перегрузки при резкой остановке кабелеукладочной машины, крутых поворотах, нарушении синхронности движения машин колонны и т.д.

Прокладка ОК в грунт, как и в случае электрического кабеля, может производиться бестраншейным и траншейным способами.

В последнее время прокладка ОК без металлических оболочек осуществляется в пластмассовых трубах. Это обусловлено тем, что эти кабели имеют меньшую механическую прочность и подвержены агрессии со стороны грызунов. Известны способы протяжки ОК в предварительно проложенную в земле трубу, а также прокладка ОК, встроенных в пластмассовую трубу в заводских условиях и образующих единое целое «кабель-труба». Такая составная конструкция обладает высокой механической прочностью, влагостойкостью и защищена от грызунов. Диэлектрический ОК в трубе также не подвержен воздействию атмосферного электричества.

Таким образом, для прокладки междугородных ОК в грунт в настоящее время получили применение три способа: прокладка кабелеукладчиком, траншейная прокладка и прокладка кабеля в пластмассовой трубе.

Для ОК городского типа преимущественное применение получила прокладка в канализации. Возможна также подвеска ОК на опорах и по стенам здания.

При пересечении трассы кабеля с другими подземными сооружениями должны соблюдаться следующие габариты по вертикали: от трамвайных и железнодорожных путей – не менее 1 метра от подошвы рельсов; от шоссе дорог – не менее 0,8 метра ниже дна кювета, от силовых кабелей – выше или ниже их на 0,5 метра, от водопровода и канализации – выше на 0,25 метра, от нефте- и газопровода – выше или ниже на 0,5 метра.

Прокладка кабеля с помощью кабелеукладчика (бестраншейная прокладка) является наиболее распространенным способом и широко применяется на трассах в различных условиях местности. В этом случае ножом кабелеукладчика в грунте прорезается узкая щель и кабель укладывается на ее дно. При этом механические нагрузки на кабель достаточно высоки, так как кабель на пути от барабана до выхода из кабеленаправляющей кассеты

подвергается воздействиям продольного растяжения, поперечного сжатия и изгиба, а также вибрационному воздействию в случаях применения вибрационных кабелеукладчиков. В зависимости от рельефа местности и характера грунтов, конструкции и технического состояния кабелеукладчика и режимов его работы механические нагрузки на кабель могут изменяться в довольно широких пределах.

Траншейный способ прокладки ОК в грунт аналогичен прокладке электрических кабелей. Кабель укладывается в заранее открытую траншею. Ширина траншеи наверху 0,3 метра, на дне 0,1...0,2 м. Глубина прокладки кабеля 1,2 м. Однако при прокладке ОК необходимо соблюдать большие меры предосторожности, обеспечивающие допустимые пределы растяжения, изгибов, закручивания и стирания кабеля. Кроме того, при прокладке ОК большой длины (свыше 2 км) возникают организационные трудности, так как траншея остается раскопанной в течение длительного времени, а это приводит к проблеме охраны траншеи и кабельных барабанов.

Сравнивая траншейный способ прокладки с бестраншейным с помощью кабелеукладчика, следует отдать предпочтение последнему. Прокладка кабеля с помощью кабелеукладчика более производительна и сокращает трудоемкость в 10...20 раз. При использовании кабелеукладчика практически одновременно производятся образование траншеи, размотка и укладка кабеля. Поэтому траншейный способ применяется лишь там, где использование кабелеукладчика невозможно по условиям местности (населенные пункты, сложная трасса, тяжелые грунты и т.д.). Траншея отрывается механизмом или вручную. Чаще всего для этой цели применяются экскаваторы.

Прокладка кабеля в пластмассовой трубе распространяется на чисто диэлектрические ОК без металлических оболочек. Достоинством таких кабелей является стойкость против электромагнитных воздействий (грозы, высоковольтные линии и т.д.). Но они уязвимы для грызунов и менее механически прочны. Размещение оптического кабеля в пластмассовом трубопроводе позволяет повысить механическую прочность и влагостойкость кабеля и защитить его от грызунов.

Известны два способа реализации:

1. Протяжка ОК в предварительно проложенный в земле пластмассовый трубопровод.
2. Прокладка ОК, встроенного в пластмассовую трубу в заводских условиях и образующего единое целое «кабель-труба»

Процесс **прокладки оптического кабеля в телефонной канализации** состоит из двух этапов: подготовительного и собственно прокладки. Подготовительный этап включает входной контроль кабеля, группирование строительных длин и подготовку телефонной канализации. Входной контроль заключается в общем осмотре кабеля, простейшем просвечивании и измерении затухания световодов.

7. Особенности эксплуатации ВОЛС

7.1. Организация эксплуатации ВОЛС

Для обеспечения бесперебойного действия линий связи организуется служба линейной эксплуатации, основной задачей которой является постоянное содержание линий в исправном состоянии. Бесперебойное действие линии достигается постоянным техническим надзором за их состоянием, систематическим выполнением профилактических мероприятий по предупреждению повреждений, своевременным устранением возникающих неисправностей и проведением необходимых работ.

Для обозначения кабельной линии на местности и запрещения несогласованных раскопок и других работ в охранных зонах кабеля на трассе устанавливаются замеры столбики высотой 0,5 м над землей и предупредительные знаки «Копать запрещается. Охранная зона кабеля». Замерные столбики располагаются против соединительных муфт, на поворотах трассы и у контуров заземлений.

Для осуществления работ по контролю за состоянием линейных сооружений, защите кабелей от влияний и коррозии организуются производственные лаборатории. Для работ по ремонту и реконструкции линейных сооружений создаются ремонтно-восстановительные бригады.

Линейные сооружения на городских телефонных сетях обслуживает линейная служба, в состав которой входят в зависимости от мощности сети различные специализированные группы, например, кабельная, канализационная, группа, обслуживающая наземную часть сети (шкафы, вводы, кабельные ящики). Для проведения измерений и работ по защите от коррозии на ГТС создаются производственные лаборатории.

С целью систематического анализа состояния ВОЛС, эффективности применяемых методов эксплуатации, приборов и устройств, причин, характера и длительности устранения аварий и повреждений, накопления статистических данных о работе ВОЛС и её надёжности все эксплуатационные предприятия и управления ведут соответствующую производственную документацию. Производственная документация подразделяется на оперативно-техническую и техническую. В состав оперативно-технической документации входят: протоколы измерений и контроля параметров передачи ВОЛС (затухания, дисперсии, функции распределения неоднородностей по длине ВОЛС и группового времени задержки), сведения о повреждениях и авариях ВОЛС, а также данные по её ремонту и устранению повреждений, протоколы и журналы проверки содержания ВОЛС под избыточным давлением, документация по её охране. Техническая документация ВОЛС состоит из электрических паспортов рабочей и монтажной документации, паспортов телефонной канализации, трассы, оборудования, приборов и механизмов, а также нормативных

документов. Основным источником информации о надёжности ВОЛС является сбор и анализ материалов по ее повреждениям. При анализе должны учитываться все повреждения, в том числе и без простоев связи.

7.2. Эксплуатационно-техническое обслуживание ВОЛС

К эксплуатационно-техническому обслуживанию ВОЛС относятся охрана; техническое обслуживание и профилактика; контроль за техническим состоянием; ремонт; аварийно-восстановительные работы; реконструкции; измерения параметров; защита от внешних влияний и коррозии; содержание под избыточным газовым давлением.

Охрана ВОЛС осуществляется с целью предупреждения механических повреждений ОК при проведении строительных и земляных работ в пределах трассы линии связи. Наибольший эффект в этой работе дают профилактические мероприятия, включающие следующие виды работ: систематический контроль за состоянием ВОЛС, разъяснительная работа на предприятиях, строительных организациях и среди населения о важности выполнения правил по защите линии связи от повреждений, согласование на работы в охранных зонах ВОЛС, инспектирование и надзор за работами, проводимыми в этих зонах.

Техническое обслуживание и профилактика ВОЛС подразделяется на текущее и плановое. Основной задачей этих видов обслуживания является своевременное выявление и устранение неисправностей и повреждений на линии связи, позволяющие не допустить нарушения действия или ухудшения качества связи. *Под повреждением ВОЛС понимают* такое ее состояние, при котором часть параметров линии и трактов не удовлетворяет требованиям норм, однако действие связи не прекращается. Выявление повреждений производится в процессе проведения периодических электрических измерений ВОЛС и ОК или в результате показаний автоматизированных систем телеконтроля и управления за состоянием ОК.

Контроль за техническим состоянием междугородных ВОЛС осуществляется автоматически путём непрерывного контроля параметров передачи ОК, что позволяет практически немедленно получить сигналы извещения о нарушениях режима работы и авариях на ВОЛС и ОК. Непрерывный контроль даёт возможность в ряде случаев прогнозировать и предотвращать аварийные ситуации, сокращать объём профилактических работ с закрытием связей, а в ряде случаев полностью отказаться от закрытия связи.

На междугородных ВОЛС широко применяется автоматизация и телеконтроль, позволяющие принять необходимые меры к предотвращению аварии и тем самым избежать прекращения действия связи. С этой целью ВОЛС оборудуют:

- устройствами, содержания под избыточным газовым давлением, позволяющим передавать на окончный или ближайший обслуживаемый пункт

сигналы о понижении давления, а также автоматически запускать компрессорные установки для периодической подкачки воздуха;

- устройствами автоматической сигнализации и телемеханики для контроля за техническим состоянием в них регенераторов (или усилителей) с элементами управления, переключением регенераторов и других устройств, а также состоянием помещения необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП);

- устройствами для подачи и приёма в НРП дистанционного или местного электропитания;

- контрольно-измерительными пунктами для измерения потенциалов на металлических оболочках ОК.

Обеспечение контроля за работой НРП и нормального режима в НРП в системах телемеханики осуществляется путём передачи с контролируемых НРП сигналов об открытии двери (крышки) НРП, неисправности регенераторов, нарушениях температурного режима, превышении влажности, понижении давления в ОК, нарушении работы блоков электропитания.

Для переключения основных регенераторов на резервные предусматривается установка дистанционно-управляемых или автоматических устройств с посылкой на оконечный или обслуживаемый пункт ответных сигналов исполнения или сигналов извещения о срабатывании автоматических переключающих устройств. Аналогично этому обеспечивается посылка сигналов управления, необходимых для сохранности связи при повреждении станционной аппаратуры и линейных сооружений.

На ОК применяется несколько систем телеуправления и контроля (ТУ и К). Первая группа систем ТУ и К основана на создании для них специальных трактов. Подобным системам присущи следующие недостатки: высокая стоимость из-за организации специального оптического тракта; телеконтроль происходит по системе «вопрос-ответ», что увеличивает время обнаружения неисправного НРП; система не реагирует на ряд повреждений основных трактов.

Вторая группа систем ТУ и К работает на принципе разделения информационных трактов и трактов ТУ и К по оптическим несущим. Подобные системы также неэкономичны, так как кроме выделения специальных трактов для ТУ и К необходимо сокращать длину регенерационного участка из-за потерь в оптических фильтрах.

Третья группа систем ТУ и К работает по информационному тракту при аварии, когда происходит прерывание информационных сигналов. Недостаток этих систем состоит в невозможности их использования для прогнозирования отказов в ВОЛС, а также значительном времени для определения характера и места повреждения ОК и ВОЛС.

Наиболее совершенные системы ТУ и К обеспечивают постоянный контроль за состоянием оптических кабелей и трактов. Подобные системы

позволяют максимально сократить время обнаружения аварии или неисправности, а также прогнозировать отказы и повреждения оптических трактов ВОЛС. Решение последних задач требует анализа, обработки и запоминания поступающих сигналов, что осуществляется с помощью ЭВМ. В память ЭВМ вводится информация о состоянии ВОЛС и ОК, данные о характере различных повреждений и аварийных ситуаций и описание этих ситуаций сигналами телеконтроля. В результате создаётся автоматическая система управления технологическими процессами в ВОЛС (АСУТП ВОЛС). Подобные системы позволяют резко повысить эффективность и надёжность работы ВОЛС, снизить эксплуатационные расходы и увеличить производительность труда.

На ВОЛС проводятся текущий ремонт – силами кабельного участка и капитальный – ремонтно-восстановительной бригадой.

При текущем ремонте кабельных сооружений выполняются следующие работы: углубление и выноска строительных длин кабелей, устранение негерметичности кабелей, ремонт контрольно-измерительных пунктов (КИП), люков, крышек, кронштейнов в колодцах, покраска ящиков, шкафов арматуры, установка новых замерных столбиков, ремонт устройства защиты от коррозии и ударов молнии и др.

При капитальном ремонте основными работами являются: выноска или углубление кабельной линии, переустройство кабельных колодцев, устройство речных переходов, установка кабеля под давление, выполнение работ по защите от коррозии и ударов молнии, приведение оптических характеристик кабелей к нормам, замена кабелей и оборудования на лучшие, ремонт НРП и др.

Ремонтные работы выполняются по проектам и сметам с соблюдением технологических карт. Ремонтные бригады оснащаются соответствующим транспортом, оборудованием, механизмами, материалами и измерительной техникой.

7.3. Приемосдаточные испытания и составление паспорта ВОЛС

Приёмосдаточные испытания выполняются представителями строительной организации и организации, принимающей построенную ВОЛС в эксплуатацию. Приемка осуществляется путём соответствующих измерений параметров передачи оптического волокна на полностью смонтированных ретрансляционных участках (РУ) между оконечными разъёмами ОК. Нормы и объёмы обязательных измерений определяются техническими требованиями и не зависят от конструкции ОК, назначения ВОЛС и организуемой по ней системы передачи.

На ВОЛС с большой пропускной способностью, ОК которых состоят из градиентных или одномодовых оптических волокон, измеряют вносимое затухание и дисперсию всех волокон РУ. Измерения часто проводят при

условиях, наиболее близких к рабочим по спектру измеряемых сигналов и ширине полосы частот источников излучения, методам ввода и вывода оптических сигналов.

Измерения затухания и дисперсии оптического волокна проводят в обоих направлениях передачи РУ от пункта А к Б и от Б к А, что позволяет учесть различия значений измеряемых параметров, обусловленные неоднородностью ВОЛС, а также выбрать оптимальный вариант использования волокна на данном РУ. Таким образом, для проведения приёмочных испытаний необходимо на обоих концах РУ иметь полные комплекты измерительной аппаратуры (передающую и приёмную части).

Данные измерений в обоих направлениях передачи заносят в соответствующие таблицы паспорта ВОЛС. По полученным данным определяют статистические характеристики ОК на измеряемом РУ ВОЛС:

средние значения затухания и дисперсии $\alpha = \sum_{n=1}^N \alpha_n / N$; $\tau = \sum_{n=1}^N \tau_n / N$. При необходимости определяют законы распределения значений указанных величин, а также вероятность превышения ими заданных норм.

Кроме параметров передачи оптического волокна часто, особенно для магистральных ВОЛС, определяют функцию распределения неоднородностей волокна по длине линии. Измерения производят с обоих концов РУ ВОЛС с помощью оптических рефлектометров. Данные измерений наносят на кальку и заносят в паспорт РУ ВОЛС.

При наличии в ОК проводников для организации дистанционного питания измеряют их сопротивление и проверяют электрическую прочность изоляции между проводами и каждым проводом и землей. В случае нахождения ОК под избыточным газовым давлением при приемке РУ ВОЛС проверяют герметичность защитных покровов волокна. В паспорт РУ ВОЛС включают схему соединения волокон в каждой соединительной муфте, где проводилось их группирование.

Существенной особенностью паспорта ВОЛС, особенно при отсутствии в конструкции ОК металлических проводников, являются повышенные требования к точности карты трассы прохождения ВОЛС. Если в обычных кабельных линиях трасса прохождения кабеля определяется с помощью cableискателей, то в ОК без металлических элементов подобный принцип отыскания трассы неприемлем. Поэтому трасса прохождения кабеля и данные о расстоянии между конкретной его точкой и реперными точками трассы (обычно НРП, замерными столбиками ОК или близко расположенной дороги, отдельными ориентирами на местности и др.) должны быть нанесены на карте трассы ОК с погрешностью не более $\pm(0,3...0,4)$ м. Такая точность нанесения трассы ОК достигается путём использования точных геодезических приборов или с помощью оптических лазерных дальномеров.

7.4. Измерения параметров ВОЛС

В процессе изготовления оптических кабелей, а также при строительстве и эксплуатации ВОЛС проводится комплекс измерений с целью определения состояния кабелей и линий, а также накопления статистических данных для разработки мер повышения надёжности связи.

В процессе *технической эксплуатации ВОЛС* осуществляется комплекс измерений с целью определения электрического состояния линейных сооружений, предупреждения повреждений и их устранения. В комплекс входят следующие измерения: профилактические, аварийные и контрольные.

Профилактические измерения проводятся с целью выявления и устранения возникших в процессе эксплуатации отклонений оптических параметров линейных сооружений от норм. Эти измерения выполняются в плановом порядке периодически в определённые промежутки времени.

Аварийные измерения производятся с целью определения характера и места повреждения или аварии кабелей. Порядок измерений следующий: вначале измеряются оптические параметры с целью определения характера и района повреждения кабеля, затем выполняются измерения для уточнения места повреждения на трассе. В случае необходимости повреждённое место кабеля вырезается и делается временная, а в последующем и постоянная кабельные вставки.

Контрольные измерения проводятся после окончания ремонтных и аварийных работ с целью определения качества ремонтно-восстановительных работ.

В *заводских условиях* измеряются заготовки, оптические волокна и кабели. Определяются конструктивные и оптические характеристики волокна, зависимость их от частоты, длины волны, температуры, механических воздействий. Для измерения используется, как правило, специализированная аппаратура, работающая в автоматизированном режиме.

Выходными параметрами заводских испытаний являются паспортные данные ОК, подтверждающие соответствие действующим нормам ГОСТ и ТУ.

В процессе *строительства ВОЛС* измерения ограничиваются определением одного-двух параметров, позволяющих контролировать качество связи. Обычно измеряется затухание, вносимое срезками кабелей, и затухание в целом ВОЛС. Приемосдаточные измерения включают целый комплекс параметров, предусмотренный приемкой ВОЛС в эксплуатацию. Измерительная аппаратура чаще всего размещается в специально приспособленных автомашинах, что позволяет ускорить процесс монтажа ОК.

Оптические кабели так же, как и электрические, должны удовлетворять требованиям по затуханию, импульсной характеристике, пропускной способности. Однако специфическая особенность ОК, в которых электромагнитная энергия распространяется по оптическим волокнам,

представляющим собой световоды видимого и ближнего инфракрасного диапазона, обуславливает своеобразие методов и схем измерения и контроля параметров, свойственных только этим кабелям. Рассмотрим методы измерения следующих характеристик оптических кабелей: передаточных (затухание, дисперсия, импульсные свойства); конструктивных и оптических (диаметр сердцевины оболочки, профиль показателя преломления, апертура и др.); физико-механических. Кроме того, рассмотрим методы определения места и характера повреждения кабеля.

Измерение затухания

Два важнейших передаточных параметра ОК (затухание и дисперсия) полностью определяют качество работы ВОЛС, их широкополосность и дальность передачи. В первую очередь рассмотрим методы измерения этих параметров. Измерение затухания осуществляют на всех стадиях производства оптического волокна, изготовления ОК, строительства и эксплуатации ВОЛС. Эти измерения часто проводятся с целью исследования зависимости затухания от тех или иных факторов и условий работы ОК: частоты (длины волны) сигналов, их модового состава, температуры, сроков эксплуатации кабеля, механических воздействий (напряжения), деформации, микроизгибов, способа ввода излучения в волокно и т.д.

Различают следующие основные методы измерений затухания ОК: прямой (сравнение сигнала на входе и выходе кабеля) и метод обратного рассеяния.

Прямой метод. Метод сравнения сигнала на входе и выходе ОК получил наибольшее распространение на практике. Можно отметить три модификации данного метода:

- измерение затухания ОК без его разрушения;
- измерение затухания ОК с разрушением (отрезанием) его концов;
- измерение вносимого затухания ОК.

Принцип метода основан на известном определении затухания линии, дБ, по формуле

$$\alpha = 10 \lg(P_0 / P_l),$$

где P_0 – мощность излучения, введенного в ОК; P_l – мощность излучения на конце кабеля длиной l , км; $\alpha = a/l$ – среднее значение километрического затухания, дБ/км. Как видим, для определения затухания в линии данным методом необходимо измерить мощность P_0 и P_l .

Метод измерения затухания без разрушения ОК даёт хорошие стабильные результаты при значениях $\alpha \geq 30..40$ дБ и, кроме того, с помощью встроенного в измерительный прибор компьютера можно автоматизировать запись и обработку результатов измерения.

Для измерения потерь на одной длине волны часто используются простейшие приборы, состоящие из излучаемого элемента, фотодиода и регистрирующего прибора.

Излучатель – полупроводниковый лазер, работающий на заданной длине волны, генерирует измерительный сигнал постоянной мощности P_0 , которая контролируется измерителем мощности, встроенным в прибор. На выходном конце ОК устанавливается измеритель мощности P_1 .

При проведении измерений на ВОЛС часто измеряют затухание в обоих направлениях передачи измерительного сигнала (α_{12} и α_{21}). Данные этих измерений используются для выбора направления передачи по тем или иным волокнам ОК. Суммарная погрешность измерения данным методом обычно не превышает 1...3 дБ.

Для определения затухания ОК с малыми потерями и $\alpha = 1$ дБ/км и менее измеряют мощность на входе и выходе кабеля при обламывании его концов. Входную мощность излучения P_0 для точности измеряют на расстоянии 3...4 м от входного торца ОК. Для этого концы кабеля обламывают. Измерение затухания в данном случае производят в следующей последовательности. Вначале измеряют мощность P_1 . Для повышения точности ее целесообразно измерять несколько раз, обламывая при каждом измерении конец ОК на несколько сантиметров.

Метод измерения вносимого затухания получил наибольшее распространение при строительстве и эксплуатации ВОЛС, а также в процессе приёмосдаточных испытаний. *Вносимым затуханием линии* называют разность уровней мощности, воспринимаемой приёмником при его непосредственном подключении к генератору, и мощности, получаемой приёмником при его подключении на выходе измеряемого волокна (ВОЛС). Таким образом, в отличие от собственного затухания волокна или ВОЛС (α_c) во вносимое затухание линии входят затухание на входе ($\alpha_{вх}$) и выходе ($\alpha_{вых}$) измеряемой ВОЛС, т.е. $\alpha_{вн} = \alpha_c + \alpha_{вх} + \alpha_{вых}$.

В приёмном устройстве прибора фотодиод преобразует входной оптический сигнал в электрическое напряжение, которое многократно усиливается в узкополосном усилителе, настроенном на частоту модуляции f_m . После детектирования это напряжение измеряется цифровым вольтметром. Результат измерения выдаётся в относительных единицах уровня мощности излучаемого светового сигнала (дБ). Динамический диапазон прибора по оптическому сигналу составляет 70 дБ, а погрешность измерения $\pm 0,1$ дБ.

Метод обратного рассеяния. Измерение потерь методом обратного рассеяния основано на наблюдении потоков обратного излучения, возникающих в оптическом волокне при прохождении по световоду зондирующего сигнала вследствие отражения от рассеянных или локальных неоднородностей. Основными достоинствами метода является возможность проведения

измерения функции распределения затухания с одного конца кабеля с одновременной фиксацией функции распределения локальных неоднородностей, а также определения места обрыва волокна и затухания в соединительных муфтах ВОЛС.

В основу метода положено измерение мощности светового потока обратного рассеяния, обусловленного рассеянием Рэлея и Френеля.

Френелевские отражения возникают в локальных неоднородностях. Регистрируя уровень рэлеевского рассеяния светового потока, движущегося в направлении, обратном направлению распространения возбуждающего сигнала, можно определить не только затухание оптического сигнала, но и функцию распространения по длине линии, а также потери в местах локальных неоднородностей, например в точках соединения строительных длин ОК.

На рис. 7.1 показана схема измерения затухания методом обратного рассеяния. Управляющее устройство (УУ) обеспечивает согласованную работу лазера (Л) и электронного осциллографа (ЭО). Генератор развёртки, запускаемый тем же импульсом, что и лазер, создает возможность наблюдения потока обратного рассеяния или полностью, или по частям. В световод через направленный ответвитель (НО) вводятся световые импульсы высокой интенсивности длительностью порядка 10...20 нс. Поток обратного рассеяния регистрируется в чувствительном фотодетекторе (ФД) и преобразуется в электрическое напряжение, которое подается на вход у ЭО, вызывая соответствующее изменение мощности луча по оси у ЭО. Вертикальная ось экрана ЭО обычно градуируется в децибелах, отклонение луча по горизонтальной оси x происходит под действием пилообразного напряжения генератора развёртки ЭО. Вследствие этого положение электронного пучка по оси x изменяется в зависимости от времени t запаздывания сигнала. Зная групповое время распространения сигнала в сердцевине волокна ($t_{гр} = 1/v_{гр}$), нетрудно осуществить градуировку горизонтальной оси в единицах длины для измеряемого типа волокна: $x = 0,5v_{гр}t$, где $v_{гр}$ – групповая скорость, а коэффициент 0,5 учитывает, что поток обратного рассеяния проходит двойной путь по оптическому волокну.

На рис. 7.1, б приведена типичная характеристика диаграммы рассеяния оптического волокна. Начальный выброс мощности светового потока обусловлен потоком отражения от торца волокна и неидеальностью направленного ответвителя. Отдельные всплески на кривой рис. 7.1 б соответствуют отражению светового импульса от локальных неоднородностей, которые возникают в соединительных муфтах ОК или в волокне. Последний всплеск кривой вызван отражением светового потока от торца световода.

Основными недостатками метода обратного рассеяния являются невысокая точность измерения и низкий динамический диапазон. Динамический диапазон современных рефлектометров обычно равен

80...90 дБ, что позволяет осуществлять измерение потерь в линии с затуханием $\alpha \leq 15...20$ дБ.

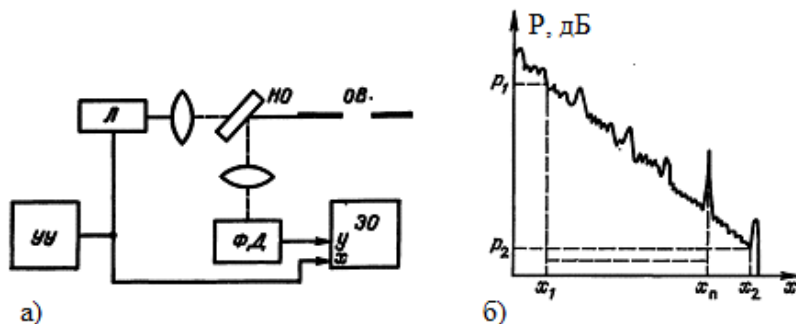


Рис. 7.1. Схема затухания методом обратного рассеяния (а) и типовая его кривая изменений (б): ОВ – измеряемое оптическое волокно

Учитывая, что мощность потоков обратного рассеяния зависит от направления прохождения зондирующего импульса, измерения с двух сторон ОК позволяют повысить точность измерения потерь при относительно коротких отрезках ОК. Если в результате измерения затухания были получены значения затухания α_{12} для передачи зондирующего импульса в направлении от конца 1 к концу 2 и α_{21} для передачи от конца 2 к концу 1, то результирующее значение измеренного затухания определяется как среднее геометрическое из двух измерений: $\alpha = \sqrt{\alpha_{12}\alpha_{21}}$.

Измерение дисперсии

Дисперсия приводит к искажению сигнала. Обычно ее оценивают по различию времени распространения составляющих сигнала (частот, типов волн) или уширению передаваемых импульсов.

Зависимость группового времени распространения от длины волны может быть получена измерением на различных длинах волн изменения времени задержки или фазы огибающей модулированного сигнала при прохождении по ОК. Схема измерения представлена на рис. 7.2 а. Модулированный сигнал от световода вводится через оптическую систему в кабель. Пройдя ОК, сигнал попадает на интерференционный фильтр и далее на лавинный фотодиод. Фаза огибающей сигнала, полученного с фотодиода, измеряется и сравнивается с фазой исходного сигнала. Фильтр нижних частот используется для подавления паразитных гармоник, генерируемых за счет нелинейности амплитудной характеристики световода.

Для измерения уширения импульсов служит установка, представленная на рис. 7.2 б. В качестве источника излучения используется импульсный полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 0,9$ мкм. Особенностью данного

метода является то, что на входном и выходном концах кабеля помещены частично прозрачные зеркала.

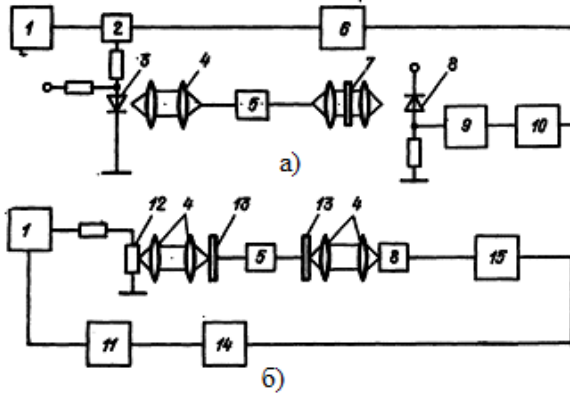


Рис. 7.2. Схема определения дисперсии:

а – измерение группового времени распространения; б – измерение дисперсии;

1 – генератор; 2 – разветвитель; 3 – светодиод; 4 – ввод излучения в кабель; 5 – ОК; 6 – вольтметр; 7 – фильтр; 8 – фотодиод; 9 – усилитель; 10 – фильтр низкой частоты; 11 – линия задержки; 12 – лазер; 13 – зеркало; 14 – импульсный осциллограф; 15 – усилитель

Световые импульсы проходят через входное зеркало в кабель и циркулируют между концами кабеля. Дисперсия определяется путем сравнения на экране осциллографа ширины импульсов, которые возвращаются из последовательных циркуляций в кабеле, с шириной входного импульса. Совмещение импульсов достигается с помощью линии задержки.

Данный метод измерения позволяет с помощью сравнительно короткого отрезка кабеля имитировать условия прохождения сигнала по линии большой длины.

Величина дисперсии определяется по формуле

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2},$$

где $t_{\text{вых}}$ и $t_{\text{вх}}$ – длительности выходного и входного импульсов.

Дисперсия предопределяет в первую очередь пропускную способность ОК

$$\Delta F = 1/\tau.$$

Так, если $\tau=20$ нс/км, то пропускная способность ΔF составит 50 МГц·км.

Пропускную способность ОК можно определить также непосредственно по результатам измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). При этом неравномерность затухания не должна превышать 3дБ.

Измерение профиля показателя преломления оптических волокон

Классификация методов измерения. Широкополосность градиентных многомодовых и одномодовых оптических волокон зависит главным образом от профиля преломления, который в свою очередь определяется профилем показателя преломления заготовок, из которых были изготовлены волокна.

Различают следующие основные методы измерения распределения показателя преломления в волокне: интерферометрические, лучевые и рассеяния, а также сканирования отражения от торца.

Интерферометрические методы. Эти методы основаны на исследовании интерференционных изображений на срезах с заготовки или оптического волокна, получаемых с помощью интерференционного микроскопа. При исследовании заготовок от конца последних делают срезы диаметром 1...2 мм, из которых изготавливают образец толщиной 0,2...0,3 мм. Торцы образца полируют и в ряде случаев помещают в иммерсионную жидкость. При исследовании волокна с последнего делают тонкий круглый срез с полированными плоскопараллельными поверхностями, через которые световой пучок может проходить нормально к поверхностям и параллельно оси световода. Фаза прошедшего через световод луча сравнивается с фазой падающего луча, и в поле микроскопа формируются интерференционные полосы, которые показывают зависимость сдвига фазы в световоде от координаты каждой точки и толщины образца.

Разность показателей преломления сердцевин и оболочки ступенчатых оптических волокон может быть определена путем наблюдения интерференционных картин совмещенного изображения торца отрезка волокна длиной l и кварцевой пластины той же толщины, через которые пропускают свет от источника излучения. В результате различного времени распространения света через пластину и по волокну из-за отличных показателей преломления наблюдается интерференция. Измеряя значения шагов между интерференционными полосами в сердцевине h_c и оболочке h_o , находят разность между показателями преломления на волне источника излучения:

$$\Delta h(\lambda) = (\lambda/l)(h_c/h_o).$$

Лучевые методы и методы рассеяния. Указанными методами можно измерять профиль показателя преломления заготовок и оптического волокна. Для этого на испытуемый образец направляют перпендикулярно его оси лазерный пучок и измеряют угол выхода пучка $\varphi(y)$ как функцию расстояния y падающего пучка от оси OX . В одном из вариантов реализации метода лазерный пучок, отражённый поворотным зеркалом, направляют в фокусирующую линзу. Перемещение пучка диаметром 20 мкм по заготовке осуществляется путём вращения зеркала. Заготовку помещают в иммерсионную жидкость, что позволяет не учитывать некруговое сечение наружной поверхности заготовки. Отклонённый пучок с помощью линзы фокусируют на датчик линейного

положения, выходное напряжение которого пропорционально углу отклонения. Обработка данных производится с помощью ЭВМ.

Метод рассеяния основан на анализе рассеянного света при поперечном освещении заготовки пучком лазера с непрерывным излучением. Диаметры пучка и заготовки в данном методе одинаковы. Положения крайних максимумов диаграммы рассеяния света (рис. 7.3) при осевой симметрии заготовки зависят от показателя преломления оболочки, а положение центральных максимумов – от разности показателей преломления и отношения диаметров сердцевины и оболочки. В этом случае по диаграмме рассеяния можно вычислить профиль показателя преломления.

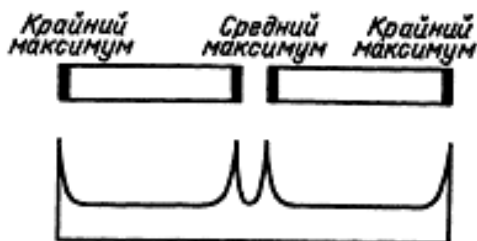


Рис. 7.3. Диаграмма рассеяния света для ступенчатого волокна

Метод сканирования отражения от торца. В этом методе сфокусированный лазерный пучок отражается от гладкой поверхности торца световода при нормальном падении, и отражённая мощность измеряется как функция координат. В результате определяется функция френелевского отражения от границы сред «торец оптического волокна-воздух».

В установке для выполнения таких измерений источником излучения обычно служит гелий-неоновый лазер, на выходе которого устанавливается прерыватель, работающий совместно с синхронным усилителем, что обеспечивает уменьшение уровня помех от сторонних засветок. Кроме того, эта система совместно с микрообъективом формирует фокальное пятно на торце волокна с диаметром 0,6...0,85 мкм по уровню мощности 0,5. Чтобы провести измерения, торец световода помещают точно в фокус микрообъектива, а другой конец испытуемого образца волокна – в кювету с иммерсионной жидкостью во избежание отражений, искажающих результаты. Затем торец медленно сканируют точно по фокальному пятну и с помощью самописца регистрируют отражённую мощность как функцию линейного перемещения световода.

Достоинством метода является непосредственное измерение профиля показателя преломлений.

Измерение числовой апертуры оптического волокна

Апертурный угол оптического волокна, находящегося в режиме равновесия мод, измеряется обычно путем наблюдения распределения

выходящей мощности. Для этого на расстоянии l , равном 10...20 мм от выходного торца волокна, поверхность которого обрабатывается, так как должна быть достаточно гладкой и строго перпендикулярной оси волокна, устанавливается отражающий экран с градуированной шкалой. Если видимый на экране диаметр светового пятна обозначить D , то апертурный угол

$$\theta_a = \arctg[D/2].$$

Для создания режима равновесия мод в коротких образцах волокна на входе последнего образуется смеситель мод. При необходимости измерения апертюры при $\lambda > 0,53 \mu\text{м}$, т.е. в спектре невидимого излучения, для определения диаметра D используется фотодетектор, который сканирует по дуге на расстоянии l от выходного торца световода. Таким образом, осуществляется регистрация распределения выходной мощности.

7.5. Определение места и характера повреждения ОК

Характерные *повреждения ОК* – нарушение целостности волокна и защитной оболочки. Методы определения места и характера повреждения оболочки аналогичны методам, широко применяемым в электрических кабелях с медными проводниками. Повреждения оптического волокна являются специфическими. Повреждением волокна считается любая неоднородность, приводящая к ухудшению передаточных свойств кабеля. Один из наиболее характерных видов повреждения – обрыв волокна.

Существуют в основном два метода определения места обрыва оптического волокна:

измерение интенсивности обратного рассеяния с помощью рефлектометра;

импульсный локационный метод определения места обрыва.

Сравнивая эффективность этих методов, следует отметить, что недостатком первого метода является низкий уровень потока обратного рассеяния, что не позволяет использовать его для определения места обрыва кабельной линии большой протяжённости.

Импульсный метод. Этот метод обладает высокой разрешающей способностью и позволяет определить как места неоднородностей, так и полного обрыва оптических волокон в кабеле.

Принцип работы прибора состоит в том, что в кабель посылается серия зондирующих импульсов и по длительности возвращения отражённых от места обрыва или повреждения волокна импульсов определяется это место (рис. 7.4).

Луч лазера, пройдя через фокусирующее устройство, попадает на полупрозрачную пластину. Последняя делит луч на две части. Одна часть луча через фокусирующее устройство попадает в световод, а затем в устройство, гасящее побочные моды. Другая часть луча, отражаясь от зеркала и полупрозрачной пластины, попадает на приемник, который состоит из

фокусирующего устройства, фотодиода, усилителя и осциллографа. Свет, отраженный в месте повреждения, возвращается по кабелю и через полупрозрачную пластину также попадает на приемник.

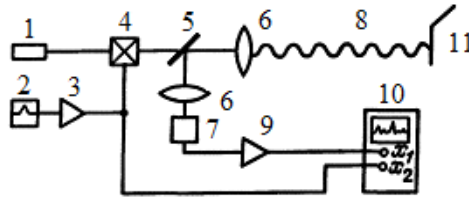


Рис. 7.4. Схема оборудования импульсных измерений:

1 – лазер; 2 – генератор импульсов; 3 – видеоусилитель; 4 – элемент Поккельса; 5 – разветвляющая пластина; 6 – фокусирующая линза; 7 – фотодиод; 8 – ОК; 9 – усилитель; 10 – осциллограф; 11 – зеркало

По разнице во времени прихода обоих импульсов определяется расстояние до места повреждения

$$l = tc / (2n \pm \Delta t c / 2n),$$

где t – разность во времени прихода обоих импульсов; Δt – уширение второго луча из-за дисперсии; c – скорость света; n – коэффициент преломления в материале световода.

Следует отметить, что импульсный метод контроля состояния ОК аналогичен импульсным методам испытания коаксиальных кабелей. Однако свой оттенок накладывает специфика оптических волокон, в которых отражённая мощность зависит от угла скола волокна. В случае воздействия на волокно только растягивающей силы возникает плоская поверхность излома, если же волокно разрушается от удара, то поверхность не является плоской. Поскольку значение эхо-импульса может зависеть от характера излома волокна, в ряде случаев импульсный метод может оказаться недостаточно точным для обнаружения места повреждения ОК.

Этим же локационным методом можно также определить параметр затухания ОК. Действительно, первый импульс I_0 , поданный на клемму x_1 , соответствует отраженному от переднего торца кабеля к поверхности фокусирующей линзы, а второй импульс I_1 – отражённому от зеркала в конце кабеля. Пользуясь полученными значениями амплитуд этих импульсов, определим затухание ОК

$$\alpha l = 20 |I_0 / I_1|.$$

Метод обратного рассеяния с применением рефлектометров. Последнее время широкое применение получили оптические рефлектометры, базирующиеся на методе обратного рассеяния. Рефлектометр позволяет определить степень регулярности ВОЛС, выявить места неоднородностей и повреждений кабеля, наличия микротрещин и изгибов, потерь в местах

соединения и затуханий как строительной длины кабеля, так и всего тракта передачи. Погрешность измерений рефлектометром составляет: затухания 0,1...1 дБ, а расстояний до места повреждения 3...10 м.

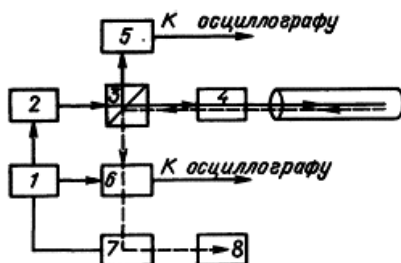


Рис. 7.5. Структурная схема рефлектометра:

1 – генератор; 2 – лазер; 3 – ответвитель; 4 – разъём; 5 – контрольный фотоприёмник;
6 – фотоприёмник; 7 – преобразователь; 8 – ответвитель

Структурная схема рефлектометра приведена на рис. 7.5. Оптический сигнал от лазера 2 через направленный ответвитель 3 и разъём 4 вводится в волокно. Сигнал обратно рассеянного излучения отводится на фотоприёмник 6 и поступает в осциллограф и систему регистрации: преобразователь 7 и самописец 8. Задающий генератор 1 служит для синхронизации работы излучателя, фотоприёмника и системы регистрации. Контрольный фотоприёмник 5 предназначен для контроля стабильности мощности и формы импульсов. Направленный ответвитель отводит часть передаваемого излучения в контрольный фотоприёмник, а обратное излучение подаёт на фотоприёмник 6.

В оптических кабелях наряду с повреждением волокон может быть также повреждение наружной пластмассовой оболочки, приводящее к проникновению в кабель влаги и ухудшению характеристик кабеля.

7.6. Влияние внешних воздействий на ОК

На характеристики ОК и их эксплуатационные свойства оказывают влияние следующие факторы: атмосферно-климатические; механические; радиационные.

Атмосферно-климатические воздействия. Из комплекса атмосферно-климатических воздействий следует выделить температуру и влагу.

Температурные воздействия, испытываемые ОК в процессе эксплуатации, возникают вследствие температурных изменений почвы. На территории РФ годовой перепад температур на глубине прокладки кабеля 1,2 м сравнительно невелик и составляет +2...+14°C. Однако в результате цикличности изменения температуры на кабель со стороны грунта периодически действуют внешние

силы, а в самом кабеле из-за его поперечной неоднородности структуры возникают внутренние напряжения.

Различие коэффициентов температурного расширения материалов сердцевины и оболочки при наличии эксцентриситета в их расположении приводит к возрастанию напряжений, которые могут привести к появлению трещин и даже разрушению волокна. Для термомеханической прочности системы необходимо, чтобы коэффициент расширения оболочки был ниже коэффициента расширения сердцевины.

Наиболее сильно кабель подвергается температурным воздействиям при транспортировке, хранении, подвеске на опорах и нахождении на поверхности земли. Здесь годовой перепад по климатологическим данным может достигать $-50...+60^{\circ}\text{C}$.

Рассматривая температурную зависимость затухания существующих оптических волокон из кварца с полимерным покрытием, можно отметить, что изменение затухания в области положительных температур сравнительно невелико, а в области отрицательных температур сказывается очень резко. Причиной увеличения затухания является разница температурных коэффициентов расширения материалов (кварца и полимера) и появления за счет этого микроизгибов и трещин волокна.

Особенно неблагоприятно на характеристики ОК сказывается одновременное действие температуры и влаги. Применяемые для изготовления ОК полимерные материалы гигроскопичны и через них диффундируют пары воды. Эта влага, попавшая в трещины или поры материала, при отрицательных температурах превращается в лед и может привести к разрушению материала.

В результате длительных испытаний установлено, что особенно агрессивно на кварцевое стекло действует водород. Он как лёгкий элемент диффундирует в стекло, соединяется с кислородом кварца (SiO_2) и образует группу ОН. Воздействие ОН на кварц приводит к ухудшению физико-механических свойств волокна, вызывает его старение и увеличение затухания.

Особенно сильно проявляется этот процесс при попадании воды в ОК, содержащие металлические элементы. В этом случае активизируется выделение водорода за счет электрохимической коррозии металла и электролиза воды. Установлено также, что процесс образования ОН активизируется при нахождении оптического волокна в действующем состоянии. В этом случае происходит ионизация водорода и ускоряется процесс образования ОН.

Важнейшей задачей при конструировании ОК является полная герметичность их надежная защита от влаги.

Механические воздействия. В процессе строительства и эксплуатации ВОЛС оптические волокна подвергаются растяжениям, изгибам, кручениям, вибрационным нагрузкам, ударам, сжатиям и прочим воздействиям как статического, так и динамического характера. Поэтому необходимо определить

стойкость кабелей к указанным видам нагрузок и пригодность их для строительства и эксплуатации в различных режимах использования.

Следует отметить, что ОК и волокна довольно стойки к изгибам и кручениям и выдерживают большие продольные нагрузки. В то же время оптические волокна весьма критичны к поперечным нагрузкам и ударным воздействиям. Они приводят к деформациям, разрушениям волокна и вызывают увеличение затухания.

По сравнению с медными проводниками оптические волокна обладают более высокой прочностью на растяжение и уступают им по стойкости к радиальным воздействиям. Поэтому как в процессе строительства, так и при эксплуатации ВОЛС необходимо предохранять оптические кабели в первую очередь от поперечных внешних нагрузок.

Радиационные характеристики. В современной технике возможны такие условия использования кабельных изделий, при которых они оказываются под кратковременным или длительным воздействием корпускулярных либо волновых радиоактивных излучений высокой энергии. При этом важно знать степень стойкости материалов к воздействию излучений, сохранения ими своих оптических и механических свойств, т.е. радиационной стойкости. Наиболее чувствительной частью ОК является оптическое волокно. Действие радиации на волокно разделяется на три основные категории: образование центров окраски, приводящее к люминесценции и увеличению затухания; изменение плотности волокна, влияющее на дисперсию; изменение свойств полимерных материалов, влияющее на их механические параметры. Под действием ионизирующего излучения в стекле образуются электроны и дырки. Образовавшиеся электроны и дырки захватываются дефектами или примесями с образованием дефектных центров, которые могут иметь полосы поглощения. При рекомбинации электронов и дырок возникает люминесценция. Кроме того, облучение стекол частицами с достаточно высокой энергией может приводить к образованию дополнительных дефектов.

Окончательный вывод о максимально допустимом для ОК значении поглощенной дозы может быть сделан исходя из конкретных технических требований, предъявляемых к этим кабелям, конструктивных особенностей кабелей и экспериментальных данных по зависимости свойств конструктивных материалов от поглощённой дозы.

В арсенале средств по восстановлению характеристик оптических волокон и повышению их радиационной стойкости имеются: *фотопросветление* (состоит в воздействии на облучённое волокно видимым и инфракрасным излучениями – за счёт этого снижаются потери, наведённые радиацией), *экранирование* (выполняется путём нанесения на волокно тонкого металлического покрытия, предохраняющего стекло от радиооблучения), *добавка легирующих присадок* (германий, фосфор и др.) – существенно повышают радиационную стойкость оптических волокон.

8. Техничко-экономическая эффективность и перспективы развития ВОЛС

8.1. Техничко-экономический анализ

Сравним оптические кабели с их аналогом – электрическими кабелями (симметричными и коаксиальными), а также направляющими системами (НС) передачи (волноводами, сверхпроводящими кабелями, воздушными линиями). Основные показатели различных НС передачи высокочастотной энергии сведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Направляющая система	Затухание			Внешнее поле	Диапазон частот, Гц
	α_m	α_d	α_n		
Воздушная линия	+	+	+	+	До 10^5
Симметричный кабель	+	+	+	+	До 10^6
Коаксиальный кабель	+	+	-	-	До 10^8
Сверхпроводящий кабель	-	+	-	-	До 10^9
Волновод	+	-	-	-	$10^{10} \dots 10^{11}$
Оптический кабель	-	+	-	-	$10^{13} \dots 10^{15}$

Из таблицы видно, что по частотному диапазону использования наиболее широкие возможности открывают волноводы и световоды (оптические кабели), а также коаксиальные кабели. Весьма ограниченный диапазон имеют симметричные цепи. Воздушные линии и симметричные кабели используются в диапазоне не выше $10^5 \dots 10^6$ Гц. Коаксиальные цепи магистральной связи и телевидения работают в диапазоне до 10^8 Гц, а по антенно-фидерным коаксиальным кабелям передаются метровые, дециметровые и реже сантиметровые волны (до 10^9 Гц). Волноводы занимают, главным образом миллиметровый диапазон волн ($10^{10} \dots 10^{11}$ Гц). Оптические кабели работают в диапазоне частот $10^{14} \dots 10^{15}$ Гц. По сверхпроводящим кабелям предполагается передача информации в диапазоне до 10^9 Гц.

На рис. 8.1 показаны частотные зависимости коэффициента затухания различных НС. Из рисунка видно, что симметричные цепи (кабельные и воздушные) резко увеличивают свое затухание с ростом частоты. Им свойственны все три вида потерь: в металле α_m , в диэлектрике α_d и на излучение α_n . В коаксиальных кабелях затухание состоит лишь из $\alpha_m + \alpha_d$ и возрастает более плавно. Потеря на излучение эти кабели как закрытые системы не имеют. В

лучших условиях находятся волноводные системы, затухание которых определяется лишь потерями α_m , потери α_d и α_n отсутствуют. Затухание волноводов в отличие от других НС с частотой уменьшается. Как видно из рисунка, они не пропускают диапазон частот примерно до 10^9 Гц, а в области более высоких частот ($10^{10} \dots 10^{11}$ Гц) обладают весьма малым затуханием. Оптические кабели имеют потери на поглощение в диэлектрике и на рассеяние, связанные с геометрической неоднородностью реальных систем. Они пропускают сигналы со сравнительно небольшим затуханием в диапазоне частот $10^{13} \dots 10^{15}$ Гц.

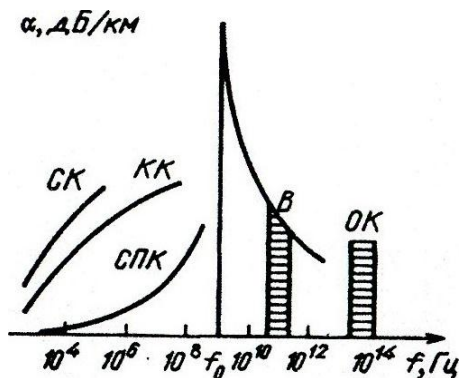


Рис. 8.1. Частотные зависимости затухания симметричного кабеля (СК), коаксиального (КК), сверхпроводящего (СПК), волновода (В) и оптического кабеля (ОК)

Вне конкуренции по затуханию находится сверхпроводящий кабель. Его затухание ничтожно мало, оно меньше затухания обычного кабеля в 10^4 раз до частоты 1 МГц и 10^2 раз до 1 ГГц. Однако, как видно из рис. 8.1, сверхпроводящий кабель имеет очень малое затухание лишь до частоты 10^9 Гц, а затем оно резко возрастает. Затухание сверхпроводящего кабеля определяется в основном потерями в диэлектрике и за счет неоднородностей линии.

Сопоставляя приведенные системы по наличию внешнего электромагнитного поля и защищенности от взаимных и внешних помех, можно признать, что в наивыгоднейших условиях находятся коаксиальный кабель и волновод. Эти конструкции являются полностью экранированными закрытыми системами, не имеют излучения и свободны от взаимных и внешних помех. Также весьма высокой помехозащищенностью обладает оптический кабель. Сверхпроводящий кабель выгодно отличается высокими экранирующими свойствами и малыми собственными тепловыми шумами.

При передаче по различным НС используются различные классы волн. Коаксиальные, симметричные и сверхпроводящие кабели работают на

основной волне, имеющей поперечное электромагнитное поле (Т). Эти линии двухпроводные, и определяющими в них являются токи проводимости в металле. По волноводам передаются волны высшего порядка (E_{nm} и H_{nm}), обусловленные токами смещения в диэлектрике и токами проводимости в металлических стенках волновода. Здесь передача осуществляется по однопроводной системе – трубе. Для передачи по световодам (оптическим кабелям) используются гибридные (смешанные) волны EH_{nm} и HE_{nm} и симметричные волны E_{0m} и H_{0m} , обусловленные токами смещения.

Таблица 8.2

Направляющая система	Класс волны	Число каналов	Система связи	Область применения
Воздушная линия	Т	10	В-12	Зоновая связь
Симметричный кабель	Т	100	К-60: К-1020	То же
Коаксиальный кабель	Т	1000...10000	К-1920: К-3600: К-10800	Магистральная связь
Сверхпроводящий кабель	Т	1000...10000	К-1920: К-3600: К-10800	То же
Волновод	E_{nm} , H_{nm}	30000	-	»
Оптический кабель	EH_{nm} , HE_{nm} , E_{0m} , H_{0m}	30000	ИКМ-120 ИКМ-480 ИКМ-1920	Городская и междугородная связь

Сопоставляя различные линии по допустимой мощности передачи, следует признать, что лучшие данные у волновода, затем идут коаксиальные кабели и, наконец, симметричный кабель и воздушная линия.

Сравнительная технико-экономическая эффективность различных НС может быть охарактеризована стоимостью 1 кан.-км. Эти данные приведены на рис. 8.2.

Сравнивая приведенные НС в целом, можно признать, что в сумме показателей наилучшими являются коаксиальный и оптический кабели. Достоинством коаксиального кабеля является широкополосность и высокая помехозащищенность.

Оптические кабели могут рассматриваться как перспективное средство передачи широкополосной информации в узконаправленном луче оптического диапазона. Их достоинством являются малые масса и габаритные размеры, гибкость и возможность прокладки, как и обычных кабелей, по реальной

трассе. Кроме того, они изготавливаются большими строительными длинами и без применения металлов.

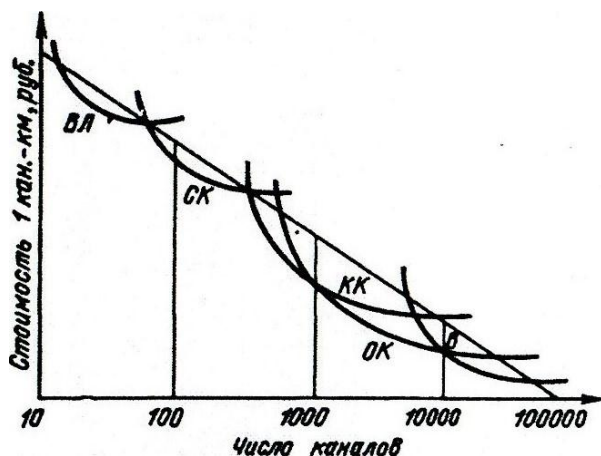


Рис. 8.2. Эффективность различных направляющих систем: ВЛ – воздушная линия; СК – симметричный кабель; КК – коаксиальный кабель; ОК – оптический кабель; В – волновод

Хорошим средством передачи широкополосной информации является также цилиндрический волновод при использовании волны H_{01} . Такой волновод позволяет получить большое число телефонных и телевизионных каналов. Существенным недостатком волноводов является громоздкость конструкции и малые строительные длины.

Симметричные цепи (воздушные линии и симметричные кабели) широко используются для устройства междугородних и местных связей в ограниченном диапазоне частот (как правило, до 1 МГц). Этим цепям свойственны все недостатки открытых систем – большие потери энергии и плохая защищенность от взаимных и внешних помех.

Сверхпроводящие кабельные линии связи являются перспективным средством передачи различной современной информации на большие расстояния. Однако технико-экономическая эффективность их в настоящее время невелика. Сверхпроводящие кабели позволяют организовать многоканальную связь на огромные расстояния без электронных усилительных устройств. Но для поддержания низких температур необходимо иметь через каждые 10...20 км криогенные станции, стоимость которых довольно высока. Поэтому затраты на сооружение сверхпроводящей магистрали пока еще значительно превышают затраты на обычную кабельную магистраль. В

настоящее время сверхпроводящие коаксиальные кабели получили применение в антенно-фидерных устройствах и различных установках радиоэлектроники.

Из рис. 8.2 видна вполне обоснованная закономерность снижения стоимости 1 кан.-км линии связи с увеличением числа каналов. Стоимость канала обратно пропорциональна $1/\sqrt{N}$, где N – число каналов. В этом плане имеется прямая связь между экономичностью системы и ее широкополосностью. Как видно из рисунка, самой дешевой является связь по световоду и волноводу, затем идет коаксиальный кабель, и наконец, самой дорогой является связь по воздушным линиям.

Области эффективного применения различных НС показаны на рис. 8.3.

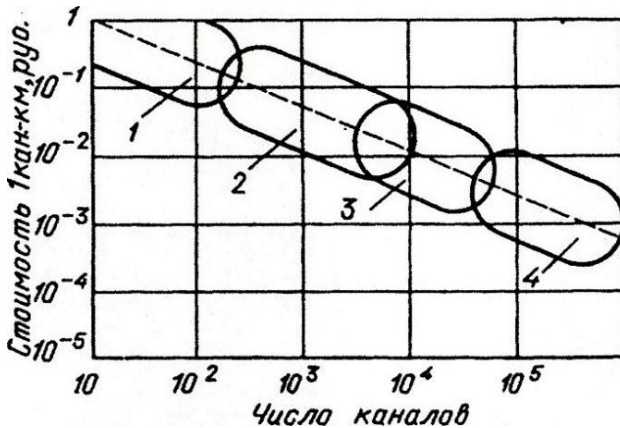


Рис. 8.3. Области эффективного применения различных направляющих систем: 1 – симметричный кабель; 2 – коаксиальный кабель; 3 – волновод; 4 – оптический кабель

Эффективность применения тех или иных типов линий связи во многом зависит от требуемого числа каналов связи и телевизионного вещания на проектируемой магистрали, принятых систем передачи, соотношения стоимости кабеля и аппаратуры и других факторов. Целесообразность применения различных НС в зависимости от требуемого числа каналов приведена ниже:

- до 50 – воздушная линия;
- 500 – симметричный кабель;
- 10 000 – коаксиальный кабель;
- выше 30000 – волновод;
- от 1000 и выше – оптический кабель.

Отсюда видно, что коаксиальные кабели по сравнению с симметричными эффективны, начиная с 500 каналов связи. Область их эффективного использования распространяется до 30 тыс. каналов. При большей потребности

в каналах связи начинают проявляться преимущества волноводов. Оптические кабели целесообразно применять при потребности в 1000 и более каналов и во всех случаях, когда ограничены ресурсы меди.

Сравнительные данные электрических и оптических кабелей приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Система передачи	Скорость передачи, Мбит/с	Электрический кабель		Оптический кабель		Область применения
		Тип кабеля	Длина усилительного участка, км	λ , мкм	Длина регенерационного участка, км	
ИКМ-30	2	Симметричный	1,5...4,5	0,85	15	ГТС
ИКМ-120	8,5	Коаксиальный: 0,7/2,9 1,2/4,4	4 8	0,85 1,3	14 17	ГТС, зонавая связь
ИКМ-480	34	Коаксиальный: 0,7/2,9 1,2/4,4 2,6/9,5	2 4,1 9,3	- 0,85 1,3	- 12 39	Зонавая и магистральная связь
ИКМ-1920	140	Коаксиальный: 1,2/4,4 2,6/9,5	2 4,6	0,85 1,3	10 20	Магистральная связь

Из табл. 8.3 видна высокая технико-экономическая эффективность ОК. Во-первых, достигается большая экономия цветных металлов, во-вторых, обеспечивается существенно меньшее затухание. Так, при работе системы ИКМ по электрическому кабелю длина усилительного участка составляет 9,3 км, а по оптическому кабелю – 12 км на волне 0,85 мкм и 39 км на волне 1,3 мкм.

На рис. 8.4 приведены кривые относительной стоимости 1 кан.-км для цифровых ВОЛС (кривая 2). На этом же рисунке представлена зависимость средней стоимости 1 кан.-км при работе связи по электрическим кабелям (кривая 1). Из рисунка видно, что стоимость связи по ОК падает с ростом числа канала в более резкой зависимости. Оптические системы по сравнению с электрическими дороже при небольшом числе каналов и дешевле при большом числе каналов. В настоящее время экономически целесообразными являются ВОЛС со скоростью 34 Мбит/с и выше.

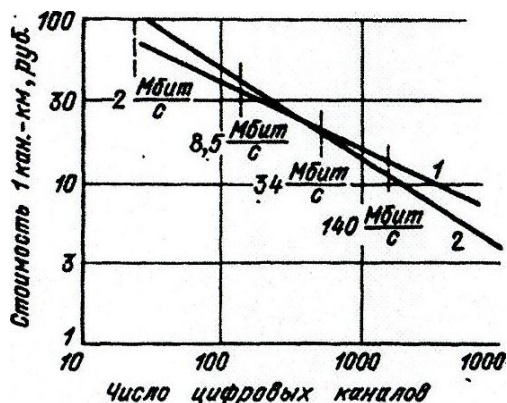


Рис. 8.4. Стоимость 1 кан.-км линии передачи:
1 – электрический кабель; 2 – оптический кабель

Имея в виду, что основные потребности нашей страны в каналах на обозримую перспективу находятся в пределах эффективного применения коаксиальных кабелей (от 500 до 10000), они получили широкое развитие на магистральной сети связи страны. Однако, учитывая достоинства оптических кабелей, им уже сейчас отдается предпочтение в новом строительстве как магистральных, так и городских и зонавых сетей связи.

8.2. Перспективы развития волоконно-оптической связи

Основные достоинства ВОЛС и некоторые области их использования перечислены на рис. 8.5. Для систем связи существенными являются показатели 1-5, для автоматизированных систем управления и ЭВМ – показатели 1-3. Мобильные подвижные системы требуют в первую очередь обеспечения показателей 1, 2, 6.

Область возможных применений ВОЛС весьма широка – от линий внутригородской связи и бортовых комплексов до систем связи на большие расстояния с высокой информационной емкостью. На основе оптической волоконной связи могут быть созданы принципиально новые системы передачи информации, а также существенно улучшены и удешевлены существующие системы. Весьма перспективно применение оптических систем в кабельном телевидении, которое обеспечивает высокое качество изображения и существенно расширяет возможности информационного обслуживания индивидуальных абонентов. В этом случае обеспечивается заказная система приема и предоставляется возможность абонентам получать на экранах своих телевизоров изображения газетных полос, журнальных страниц и справочных данных из библиотек, учебных центров, специальных центров хранения информации. Развитие получит видеотелефонная связь, при которой абоненты

смогут не только слышать, но и видеть друг друга. Перспективной областью применения ВОЛС является высокоскоростная связь внутри мощных ЭВМ, между ЭВМ и терминалами, а также между отдельными ЭВМ на расстоянии от нескольких метров до десятка километров.

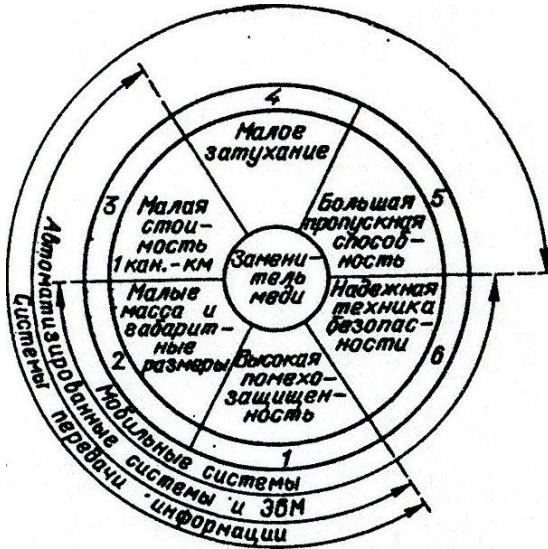


Рис. 8.5. Основные достоинства и главные области применения ВОЛС

Представляет интерес применение ВОЛС в системах управления производственными процессами в условиях повышенной опасности для здоровья человека (например, на атомных электростанциях, химических предприятиях), а также в условиях сильных электромагнитных помех, возникающих при включении и выключении силовых кабелей, силовоточных реле и т.д.

Высокая помехозащищенность, скрытность передачи, малая масса и небольшие габаритные размеры особенно важны при использовании ВОЛС в бортовой радиоэлектронной аппаратуре самолетов, танков, кораблей и подводных лодок.

Первые ВОЛС использовали длину волны $\lambda=0,8...0,9$ мкм и были разработаны на многомодовых волокнах. В настоящее время получили развитие более длинные волны $\lambda=1,3...1,6$ мкм и одномодовые волокна. Потери в оптических волокнах при этом снижаются до $0,2...0,5$ дБ/км, что позволяет увеличить длину регенерационного участка в линии связи до $50...80$ км. Это дает возможность использовать ОК междугородной связи, так как исключается потребность в дистанционном электропитании линейных регенераторов и

упрощается конструкция кабеля (не нужны медные жилы для дистанционного питания НУП).

За последнее время появилось новое направление в развитии волоконно-оптической техники – использование среднего инфракрасного диапазона волн 2...10 мкм. Ожидается, что потери в этом диапазоне не будут превышать 0,2 дБ/км. Это позволит осуществить связь на большие расстояния с участками регенерации до 100 км. Исследование фтористых и халькогенидных стекол с добавками циркония, бария, а также других соединений, обладающих сверхпрозрачностью в инфракрасном диапазоне волн, позволит еще больше увеличить длину регенерационного участка.

Следует отметить, что если раньше в основном применялись ступенчатые многомодовые волокна, то сейчас развитие идет по пути внедрения градиентных и одномодовых волокон. Изготовление последних сложнее (диаметр сердечника 6...8 мм), однако они обладают широкой информационно-пропускной способностью и дальностью передачи.

Оптические кабели с одномодовыми волокнами получили развитие на междугородных линиях связи большой протяженности и на подводных магистралах. Кабели с многомодовыми волокнами широко применяются на городских телефонных сетях и на объектовой связи.

В основном используется временное разделение каналов, которое предъявляет высокие требования к быстродействию источников, модуляторов и приемников излучения для увеличения пропускной способности канала. Под временным разделением понимается передача на одной оптической несущей весьма коротких импульсов с высокой частотой следования. Однако возможности временного разделения каналов ограничены наличием дисперсии в волоконных световодах.

Большие усилия были направлены на изготовление волоконных световодов, обладающих большей широкополосностью (произведение ширины полосы на расстояние) на заданной оптической несущей. Получены световоды с широкополосностью порядка 1 ГГц одновременно для многих оптических несущих в диапазоне 0,7...1,6 мкм. Ожидаются новые интересные результаты в использовании нелинейных оптических явлений, в частности солитонного режима распространения оптических импульсов, когда импульс может распространяться без изменения формы или периодически менять свою форму в процессе распространения по световоду. Использование этого явления в волоконных световодах позволит существенно увеличить объем передаваемой информации и дальность связи без применения ретрансляторов.

Весьма перспективно использование в ОК частотного разделения каналов, которое заключается в том, что в световод одновременно вводится излучение от нескольких источников, работающих на разных частотах, а на приемном конце с помощью оптических фильтров происходит разделение сигналов. Такой способ разделения в ВОЛС получил название спектрального

уплотнения или мультиплексирования. При интервале между оптическими несущими 10 нм в диапазоне 0,8...1,8 мкм можно реализовать в принципе 100 каналов. Спектральное уплотнение позволит использовать практически всю сверхширокую оптическую полосу пропускания волоконных световодов, которая примерно составляет $2 \cdot 10^5$ ГГц.

Распространение систем со спектральным уплотнением ограничивается пока отсутствием специальных излучателей. Каждый такой излучатель должен состоять из нескольких стабильных источников света примерно одинаковой интенсивности с длинами волн излучения, разделенными одинаковым спектральным интервалом. В настоящее время для организации двусторонней связи между двумя пунктами с помощью ВОЛС требуется два волокна в кабеле. Спектральное уплотнение обеспечит такую связь по одному волокну.

При рассмотрении структур абонентских сетей ВОЛС кроме традиционной структуры телефонной сети радиально-узловой типа должны учитываться также возможности организации кольцевых сетей. Важным преимуществом кольцевой структуры является экономия кабеля, поскольку при такой структуре вместо индивидуальных абонентских линий, соединяющих каждый аппарат с узлом коммутации, применяются групповые линии, последовательно проходящие через ряд аппаратов.

Можно полагать, что в ВОЛС второго поколения усиление и преобразование сигналов в регенераторах будет происходить на оптических частотах с применением элементов и схем интегральной оптики. Это упростит схемы регенерационных усилителей, улучшит их экономичность и надежность, снизит стоимость.

В третьем поколении ВОЛС предполагается использовать преобразование речевых сигналов в оптические непосредственно с помощью акустооптических преобразователей. Уже разработан оптический телефон и проводятся работы по созданию принципиально новых АТС, коммутирующих световые, а не электрические сигналы. Имеются примеры создания многопозиционных быстродействующих оптических переключателей, которые могут применяться на подобных АТС. Например, в простейшем варианте переключателя 1×2 коммутация одного оптического входа с двумя оптическими выходами осуществляется с помощью электромагнита, перемещающего отрезок оптического волокна, покрытый металлической пленкой, между двумя стационарными положениями. Каскадно соединяя некоторое число таких переключателей, можно создавать коммутаторы. Работа переключателей контролируется микропроцессором, сигналы к которому поступают от фотоприемников, установленных в местах стыковки оптических волокон.

Для передачи изображений будет применяться такая аппаратура, которая обеспечит возможность непосредственного сканирования и разложения оптического изображения и последующую его передачу без использования

электронных схем. Все это дает возможность значительно упростить оконечное оборудование систем и улучшить их технико-экономические показатели.

Для широкого применения волоконно-оптических систем и линий связи необходимо решить целый ряд задач. К ним, в первую очередь, относятся следующие:

- проработка системных вопросов и определение технико-экономических показателей применения ВОЛС на сетях связи;
- освоение оптических волн 1,55 мкм, при которых затухание ОК и дисперсия чрезвычайно малы;
- разработка и промышленное изготовление одномодовых волоконных световодов и кабелей, а также оптоэлектронных устройств для них;
- разработка системы и аппаратуры спектрального уплотнения ВОЛС;
- создание интегральной абонентской сети многоцелевого назначения и оптической коммутации;
- создание передатчиков и приемников, непосредственно преобразующих звук-свет и свет-звук;
- освоение нового инфракрасного диапазона волн 2...10 мкм и новых материалов, например, фтористых, для изготовления световодов, позволяющих осуществить связь на большие расстояния;
- повышение степени интеграции элементов и создание быстродействующих унифицированных узлов каналаобразующей аппаратуры ИКМ с применением элементов интегральной оптики;
- создание оптических регенераторов без преобразования оптических сигналов в электрические;
- совершенствование передающих и приемных оптоэлектронных устройств для систем связи, внедрение когерентного приема;
- разработка эффективных методов и устройств электропитания промежуточных регенераторов для зональных и магистральных сетей связи;
- оптимизация структуры различных участков сети с учетом особенностей применения систем на ОК (включая абонентскую телефонную сеть, сети передачи данных, многопрограммное кабельное телевидение, видеотелефон и т.д.);
- механизация технологии прокладки и монтажа ОК;
- разработка испытательной и измерительной аппаратуры, необходимой для производства, настройки и эксплуатации комплекса оборудования и кабелей ВОЛС;
- совершенствование методов и аппаратуры для частотного и временного разделения сигналов, передаваемых по световодам;
- совершенствование технологии промышленного производства волоконных световодов и оптических кабелей и снижение их стоимости;

– разработка единой терминологии для этой развивающейся техники связи.

На основе сравнительного технико-экономического анализа различных типов линий (оптических, симметричных, коаксиальных) можно наметить дальнейшую перспективу их развития и определить область использования и место в различных звеньях сети связи страны (магистральной, зоновой, городской, сельской):

1. Для магистральной сети основным средством связи сейчас является коаксиальный кабель с применением многоканальных и цифровых систем передачи. Этот кабель удовлетворяет потребностям страны по пропускной способности и эксплуатационной надежности и обладает рядом существенных достоинств. На его изготовление идет всего лишь 5% меди.

В связи с освоением серийного производства одномодовых ОК с высокими характеристиками (затуханием, пропускной способностью, сроком службы) они как обладающие существенными преимуществами получают широкое внедрение на магистральной сети связи страны.

2. Для зоновой сети наряду с существующими симметричными кабелями должны получить широкое развитие ОК с высокоскоростными системами передачи.

3. На городских сетях уже в ближайшие годы строительство новых соединительных линий будет осуществляться с помощью волоконно-оптических линий с цифровой системой передачи.

4. На сельских сетях получают развитие оптические кабели упрощенных конструкций для организации связи и вещания для сельских потребителей.

Волоконно-оптические линии в сочетании с цифровыми системами передачи открывают широкие возможности создания *интегральной сети связи* в масштабе всей страны.

Литература

1. Семёнов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: КомпьютерПресс, 1998.
2. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. Учеб. пос. для вузов. – М., 1990.
3. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРт, 2005.

Содержание

1. Введение. Общие сведения о линиях и направляющих системах связи	3
1.1. Роль и место направляющих систем в системах связи	3
1.2. Классификация линий связи	4
1.3. Физические основы передачи электромагнитной энергии по световодам.....	5
1.4. Структурная схема волоконно-оптической связи.....	9
2. Основы теории передачи по ВОЛС	10
2.1. Типы световодов.....	10
2.2. Элементы волновой теории световодов.....	13
2.3. Затухание.....	17
2.4. Расчет дисперсии световодов.....	18
2.5. Потери на изгибах и микроизгибах световодов.....	20
2.6. Потери при стыковке световодов	21
3. Оптоэлектронные компоненты	22
3.1. Светодиоды и полупроводниковые лазеры	22
3.2. Фотоприемники	23
3.3. Оптические разветвители	23
4. Волоконно-оптические системы передачи.....	24
4.1. Принципы построения систем передачи	24
4.2. Дальность связи и длина регенерационного участка	28
4.3. Спектральное уплотнение ВОЛС	29
5. Проектирование волоконно-оптических линий связи	32
5.1. Требования к ВОЛС	32
5.2. Выбор топологии сети	32
5.3. Выбор волоконно-оптических систем передачи и кабелей	37
5.4. Методика инженерного расчета ВОЛС	39
5.5. Определение длин регенерационных участков.....	42
5.6. Выбор сигналов цифрового линейного тракта.....	44
6. Прокладка оптических кабелей	45
7. Особенности эксплуатации ВОЛС	48
7.1. Организация эксплуатации ВОЛС	48
7.2. Эксплуатационно-техническое обслуживание ВОЛС	49
7.3. Приёмсдаточные испытания и составление паспорта ВОЛС.....	51
7.4. Измерения параметров ВОЛС.....	53
7.5. Определение места и характера повреждения ОК.....	61
7.6. Влияние внешних воздействий на ОК	63
8. Техничко-экономическая эффективность и перспективы развития ВОЛС.....	66
8.1. Техничко-экономический анализ	66
8.2. Перспективы развития волоконно-оптической связи	72
Литература	77

Для заметок

СБИТНЕВ Александр Васильевич, МАТЮХИН Константин Николаевич

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

Подписано в печать 30.03.2016 г.		
Печать офсетная	Формат 60х84/16	4,29 уч.-изд. л.
4,65 усл.печ.л.	Заказ № 23	Тираж 35 экз.

Московский государственный технический университет ГА

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»

127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1

ISBN 978-5-86311-990-8

ISBN 978-5-86311-990-8

