**1 ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО**

**ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ**

**1.1 Распространение света в оптических волокнах**

**1.1.1** Основные преимущества использования оптических волокон

Оптическое волокно (оптоволокно) – это волновод с круглым поперечным сечением небольшого диаметра, по которому передается электромагнитное излучение оптического диапазона [1].

К основным преимуществам использования оптоволоконного кабеля, во-первых, относятся высокая пропускная способность и скорость передачи информации на единицу оптоволокна.

Во-вторых, в сравнении с медным проводом эквивалентной длины, использование оптоволоконного кабеля обойдется дешевле по стоимости. Высокая скорость передачи данных делает стоимость одного передаваемого по оптоволоконной сети бита данных очень низкой.

В-третьих, оптоволокно является меньшим по толщине и весу, чем сопоставимый медный кабель. Следовательно, оптоволоконный кабель можно вытянуть на меньший диаметр и использовать для мест с требованием большого количества пространства.

В-четвертых, потеря сигнала при условии использования оптических волокон меньше, чем при использовании медного провода. Также оптоволокно имеет малое погонное затухание. Благодаря такому свойству, возможна реализация протяженных высокоскоростных систем передачи данных.

В-пятых, по оптоволоконному кабелю передаются световые сигналы, которые в свою очередь никак не влияют на сигналы остальных волокон в этом же оптоволоконном кабеле, в отличие от используемых в медном кабеле электрических сигналов.

К тому же, так как никакие виды электромагнитных помех не влияют на качество передачи информации в оптоволокне, то оно может располагаться вблизи мощных источников электромагнитных помех.

Следующим важным преимуществом оптоволоконного кабеля является долгий срок службы, который составляет более 100 лет. Также возможность передавать информацию на огромные дистанции с обеспечением ее безопасности, обусловленной оптическим шифрованием и фактическим отсутствием электромагнитного сигнала.

С точки зрения безопасности оптоволокно является диэлектриком и не проводит ток, его использование безопасно по искро- и пожаробезопасности. К тому же, оптоволокно не способно притягивать молнии и может быть использовано в местах особой опасности, где из соображений безопасности кабель не предусматривается вовсе.

Также можно отметить такой пункт как секретность, так как оптическое волокно является сверхбезопасной средой для передачи информации. Оно не излучает волны, которые могут быть получены близкорасположенной антенной.

Широкая полоса пропускания, низкие потери и невосприимчивость к

электромагнитным полям характерны для волоконной оптики. Эти особенности органично согласовываются, позволяя передавать данные с высокой скоростью на большие дистанции и с небольшим числом ошибок. Однако, важность каждого из этих преимуществ зависит от конкретного применения.

**1.1.2** Эффект полного внутреннего отражения света

Оптическое волокно имеет два слоя - ядро (сердцевина) и оптическая оболочка. Внутреннее ядро предназначено для переноса света. Окружающая его оптическая оболочка имеет отличный от ядра показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в ядро. Показатель преломления оптической оболочки менее чем на 1 % меньше показателя преломления ядра. Характерные величины показателей преломления – 1.47 для ядра и 1.46 – для оптической оболочки.

Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической оболочки. Защитная оболочка, представляющая собой один или несколько слоев полимера, предохраняет ядро и оптическую оболочку от воздействий, которые могут повлиять на их оптические свойства. Защитная оболочка не влияет на процесс распространения света по волокну, а всего лишь предохраняет от ударов.

При передаче информации по оптоволоконному каналу происходит преобразование единиц и нулей двоичного сигнала в наличие или отсутствие светового потока (сигнала). Данный световой поток должен оставаться внутри оптического волокна до момента, пока не достигнет его второго конца, также он не должен проникать в оптическую оболочку оптоволокна. В случае проникновения света в оболочку, будет вызвана потеря мощности, следовательно, затухание сигнала.

Данные особенности учитываются при изготовлении оптических волокон. Внешняя поверхность изготавливается близкой по характеристикам к зеркалу для отражения распространяющихся в нем световых лучей. При условии полного отражения падающего луча по направлению к другому концу оптоволокна, можно говорить об оптимальном волноводе для передачи световых волн. Эффект полного внутреннего отражения представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Эффект полного внутреннего отражения в оптоволокне

Свет заводится внутрь волокна под углом, большим критического, к границе ядро/оптическая оболочка и испытывает полное внутреннее отражение на этой границе. Поскольку углы падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

Свет, падающий на границу под углом, меньшим критического, будет проникать в оптическую оболочку и затухать по мере распространения в ней. Оптическая оболочка обычно не предназначена для переноса света, и свет в ней достаточно быстро затухает.

Таким образом, благодаря законам отражения и преломления в современном мире существует возможность изготовления оптического волокна для передачи световых лучей с минимальными потерями энергии. Для того, чтобы в оптическом волокне происходило полное отражение световых лучей без потерь, необходимо создать условия, при которых оболочка оптического волокна имеет меньший коэффициент чем сердцевина, также угол падения световых лучей на границу между оболочкой и сердцевиной должен быть больше критического угла. При соблюдении таких требований все падающие лучи света будут отражаться внутрь оптоволокна. Данный эффект называется полным внутренним отражением и является базой производства оптических волокон.

Эффект полного внутреннего отражения заставляет световые лучи в оптоволокне проходить путь до второго конца, отражаясь от границы с сердцевиной.

**1.1.3** Распространение света в ОВ с различным профилем показателя

преломления

Профиль индекса(показателя) преломления отображает соотношение между индексами ядра и оптической оболочки. Существуют два основных вида профиля: ступенчатый и сглаженный (градиентный).

Волокно со ступенчатым профилем имеет ядро с однородным показателем преломления. При этом показатель преломления испытывает резкий скачок на границе между ядром и оптической оболочкой. Напротив, в случае сглаженного профиля показатель преломления ядра не является однородным: показатель максимален в центре и постепенно спадает вплоть до оптической оболочки. Кроме того, на границе между ядром и оптической оболочкой отсутствует резкий скачок показателя преломления.

В соответствии с данной классификацией существует три вида оптических волокон:

– многомодовое волокно со ступенчатым индексом (обычно называемое волокном со ступенчатым индексом);

– многомодовое волокно со сглаженным индексом (волокно со сглаженным индексом);

– одномодовое волокно со ступенчатым индексом (одномодовое волокно).

Многомодовое волокно со ступенчатым индексом – наиболее простой тип волокон. Оно имеет ядро диаметром от 100 до 970 микрон и может быть, чисто стеклянным, PCS, или пластик. Данный тип волокна является наиболее распространенным, хотя и не обеспечивает максимальную полосу пропускания и минимальные потери.

Поскольку свет испытывает отражение под разными углами на разных траекториях (в различных модах), длина пути, соответствующая различным модам, также отличается. Таким образом, различные лучи затрачивают меньше или больше времени на прохождение одной и той же длины волокна. Лучи, которые движутся вдоль центральной оси ядра без отражений, достигают противоположного конца волокна первыми. Косые лучи появляются позднее. Свет, попадающий в волокно в одно и то же время, достигает противоположного конца в различные моменты времени. Световой импульс расплывается во времени.

Это расплывание называется модовой дисперсией. Импульс света, который имел первоначально узкий, строго определенный профиль, в дальнейшем расширяется во времени. Дисперсия может быть обусловлена несколькими причинами. Модовая дисперсия возникает в результате различных длин траекторий, соответствующих различным модам волокна.

Типичное значение модовой дисперсии для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления составляет от 15 до 30 наносекунд за один километр. Это означает, что лучи света, попадая в волокно одновременно, достигают противоположного конца волокна длинной в один километр с интервалом от 15 до 30 наносекунд. При этом первыми приходят лучи, двигающиеся вдоль центральной оси.

Одна из возможностей уменьшения модовой дисперсии – использование сглаженного профиля показателя преломления. В этом случае ядро состоит из большого числа концентрических колец, похожих на годовые кольца дерева. При удалении от центральной оси ядра показатель преломления каждого слоя снижается.

Свет движется быстрее по среде с меньшим показателем преломления. Поэтому чем дальше расположена траектория светового луча от центра, тем быстрее он движется. Каждый слой ядра отражает свет. В отличие от ситуации со ступенчатым профилем показателя преломления, когда свет отражается от резкой границы между ядром и оптической оболочкой, здесь свет постоянно и более плавно испытывает отражение от каждого слоя ядра. При этом его траектория отклоняется к центру и становится похожей на синусоидальную. Лучи, которые проходят более длинные дистанции, делают это большей частью по участкам с меньшим показателем преломления, двигаясь при этом быстрее. Свет, распространяющийся вдоль центральной оси, проходит наименьшую дистанцию, но с минимальной скоростью. В итоге все лучи достигают противоположного конца волокна одновременно. Использование сглаженного профиля показателя преломления приводит к уменьшению дисперсии до 1 н сек/км и менее.

Популярные виды данного типа волокон имеют диаметры ядер 50, 62.5 и 85 микрон, а диаметр оптической оболочки 125 микрон. Эти волокна используются там, где требуется широкие полосы пропускания, в частности, в передаче телевизионного сигнала, локальных сетях, компьютерах и т.д. Волокно 62.5/125 является наиболее популярным и широко распространенным.

Другой путь уменьшения модовой дисперсии заключается в уменьшении диаметра ядра до тех пор, пока волокно не станет эффективно передавать только одну моду. Одномодовое волокно имеет чрезвычайно малый диаметр – от 5 до 10 микрон. Стандартный диаметр переходного слоя составляет 125 микрон и выбран, исходя из следующих соображений:

1 Оптическая оболочка должна быть в 10 раз толще, чем ядро одномодового волокна. Для ядра в 8 мкм она должна быть не менее 80 мкм.

2 Данный размер совпадает с размером оптической оболочки для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, что обеспечивает стандартизацию размеров волокон.

3 Данный выбор облегчает монтажные работы, так как делает волокно менее хрупким, а его диаметр достаточно большим, что позволяет обрабатывать волокно вручную.

Поскольку данное волокно переносит только одну моду, модовая дисперсия в нем отсутствует.

Одномодовое волокно позволяет легко достичь ширины полосы пропускания от 50 до 100 ГГц-км. В настоящее время волокна имеют полосы пропускания в несколько гигагерц и позволяют передавать сигнал на десятки километров.

Граничные значения параметров, начиная с которых волокно работает в одномодовом режиме, зависят от длины волны несущего света. Пусть длина волны 820 нм соответствует многомодовому режиму работы волокна. По мере роста длины волны света все меньшее количество мод выживает, пока не остается только одна. Одномодовый режим работы волокна начинается, когда длина волны света приближается к диаметру ядра. При 1300 нм, например, в волокне остается только одна мода и волокно становится одномодовым.

В зависимости от конструкции различные виды волокон имеют специфические длины волн, называемые, пороговыми длинами. Излучение с длиной волны, превосходящей пороговую длину, распространяется в одномодовом режиме. Волокно, предназначенное для работы в одномодовом режиме на длине волны в 1300 нм, имеет пороговую длину около 1200 нм.

Принцип работы одномодового волокна ненамного сложнее обычного распространения луча вдоль ядра. Использование геометрической оптики для описания работы данного вида волокна не совсем корректно, так как в данном подходе не учитывается распределение электромагнитной энергии внутри волокна. Некоторая часть электромагнитного излучения переносится в оптической оболочке. Кроме того, диаметр светового пучка, вводимого в волокно, превышает диаметр его ядра. Для определения поперечного размера светового пятна в волокне используется термин – диаметр модового поля. В отличие от многомодового, в одномодовом волокне излучение присутствует не только внутри ядра. Поэтому диаметр модового поля лучше характеризует излучение, чем диаметр ядра.

В одномодовом волокне излучение переносится не только внутри ядра, но и в оптической оболочке, в связи с этим возникает дополнительное требование к эффективности переноса энергии в этом слое. В многомодовом волокне прозрачность оптической оболочки практически не имеет никакого значения. Действительно, в этом случае возникновение мод в оптической оболочке является даже нежелательным, поэтому требования к ее прозрачности достаточно умерены. Для одномодового волокна это утверждение будет неверно.

**1.2 Основные характеристики оптических волокон**

**1.2.1** Основные характеристики оптических потерь ОВ

Затухание и дисперсия являются важнейшими параметрами, характеризующими волокно. Таким образом, чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяющегося в волокне сигнала, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями. Затуханием называется потеря оптической мощности по мере движения света по волокну [2].

Затухание в оптическом волокне выражается в децибелах (дБ). Коэффициент затухания в оптоволокне – это величина затухания, приходящаяся на единицу длины волокна, и выражается в децибелах/километр.

Факторы, влияющие на затухание:

– потери на рассеяние;

– потери на поглощение в материале волокна;

– поглощение на примесях;

– кабельные потери.

К собственным потерям относятся потери на рассеяние и поглощение, в то время как к дополнительным потерям относятся кабельные потери.

Полное затухание в волокне определяется по формуле 1.1.

(1.1)

где – собственные потери;

– кабельные потери;

– потери на рассеяние;

– потери на поглощение в материале волокна;

– поглощение на примесях.

Рэлеевское рассеяние обусловлено рассеянием света на случайных изменениях плотности, которые были вызваны процессом изготовления. В идеальном состоянии чистое стекло имеет молекулярную структуру и однородную плотность. В действительности же плотность стекла не является однородной. Следовательно, на неоднородностях происходит рассеяние во всех направлениях, часть его теряется в оболочке.

Потери по причине рэлеевского рассеяния зависят от длины волны по закону λ -4 (λ – длина волны), следовательно в области коротких волн они проявляются сильнее.

Поглощение в материале волокна обусловлено свойствами материала и рабочей длиной волны. Собственные потери на поглощение растут в инфракрасной области. При λ> 1,8 мкм обычное кварцевое оптоволокно становится непрозрачным, что ограничивает верхнюю длину волны пропускания.

Основным материалом для изготовления оптоволокна является кварц. Следующим видом потерь является поглощение примесями в кварце. Примесные центры в зависимости от типа примеси поглощают свет на определенных, присущих каждой примеси, длинах волн. Современные технологии производства оптоволокна позволяют поддерживать концентрацию примесей на таком уровне, данная проблема не столь важна.

Во время строительства и эксплуатации оптических кабельных линий возможно появление эксплуатационных потерь, которые обусловлены скруткой, деформацией и изгибами волокон, возникающих при наложении покрытий и защитных оболочек при производстве и прокладке кабеля.

Потери на микроизгибах обусловлены преобразованием направляемых мод в моды излучения. Они резко возрастают и становятся недопустимо большими, как только радиус изгиба уменьшается до критического значения, которое для типичных оптических волокон несколько сантиметров. При этом свет покидает волокно.

**1.2.2** Основные характеристики искажений оптического сигнала

Оптический сигнал, распространяясь по волокну, затухает и искажается за счёт естественной дисперсии различного рода (линейные искажения), которая вызывает уширение импульсов во времени, а также нелинейные эффекты, основные из которых обусловлены нелинейным преломлением и генерацией гармоник (нелинейные искажения).

Дисперсия – это зависимость фазовой скорости световых волн от частоты. Это же относится к показателю преломления. Величина дисперсии определяется по формуле 1.2.

где n – показатель преломления;

ω – частота;

λ – длина волны.

В таком случае дисперсия в объемной среде называется хроматической, что говорит о разложении света на его составляющие в цветовом спектре. Дисперсия называется нормальной (положительной), если n увеличивается с увеличением частоты ω ( ) и аномальной (отрицательной), если n уменьшается с увеличением ω ( ). Для нормальной и аномальной дисперсии зависимость фазовой скорости от частоты или от длины волны является обратной.

При прохождении импульсных сигналов под воздействием дисперсии происходит уширение импульса. Данное воздействие дисперсии на сигнал показано на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Уширение импульса под воздействием дисперсии

Уширение импульсов τ определяется как квадратичная разность длительности импульсов на входе и выходе волновода длиной Im , определяемой на половине высоты импульса, по формуле 1.2. Дисперсия измеряется в пикосекундах на километр.

, (1.2)

где – длительность импульса на выходе;

– длительность импульса на входе.

Уширение импульса определяет полосу частот передаваемого сигнала ΔF (формула 1.3).

, (1.3)

где τ – уширение импульсов.

Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну. Дисперсия ограничивает длину регенерационного участка, так как уширение импульса пропорционально длине линии. В конечном итоге может возникнуть ситуация, когда соседние импульсы перекрывают друг друга.

Выделяют три основных вида дисперсии:

– модовая дисперсия;

– материальная дисперсия;

– волноводная дисперсия.

Модовая дисперсия существует только в многомодовом волокне и вызывается различной скоростью распространения в волноводе лучей разных мод, которые достигают выхода в разное время, что приводит к уширению входного импульса.

Материальная дисперсия является дисперсией материала волновода. Она не зависет от типа волокна и отличается от хроматической дисперсии тем, что она соответствует волноводной, а не объемной среде.

Волноводная дисперсия существует в волноводной среде, которая была сформирована минимум двумя средами, в случае оптоволокна, сердцевиной и оболочкой.

Два способа уменьшения модовой дисперсии:

– уменьшение диаметра сердцевины;

– изменение профиля показателя преломления, то есть использование многомодового волокна с плавно изменяемым показателем преломления.

Материальная дисперсия зависит (для прозрачного материала) от частоты ω (или длины волны λ) и материала оптоволокна, в качестве которого используется кварцевое стекло. Такой вид дисперсии определяется электромагнитным взаимодействием волны со связанными электронами материала среды, которое носит, как правило, нелинейный (резонансный) характер и только вдали от резонансов может быть описано с приемлемой точностью, например, уравнением Селлмейера, формулой 1.4.

(1.4)

где ωj – резонансные частоты,

Rj – величина j-го резонанса.

Возникновение дисперсии в материале оптического волновода обусловлено тем, что оптический источник, возбуждающий вход (светоизлучающий диод или лазерный диод), формирует световые импульсы, имеющие непрерывный волновой спектр определенной ширины. Различные спектральные компоненты импульса распространяются с разными скоростями и приходят в определенную точку (фазу формирования огибающей импульса) в разное время, приводя к уширению импульса на выходе и, при определенных условиях, к искажению его формы.

Для описания дисперсии в волноводе используется разложение постоянной распространения моды β в ряд Тейлора в окрестности несущей частоты ω0. Линейный член этого разложения, или параметр βi, характеризует групповую скорость движения огибающей импульса – Vr = с/nr (где nr – групповой показатель преломления), а квадратичный член, или параметр β2 характеризует собственно дисперсию групповых скоростей в волокне, имеющую размерность [пс2/км]. Она и определяет уширение импульса. Можно отметить, что в диапазоне длин волн 500-1600 нм β2 почти линейно уменьшается от +70 до -40 [пс2/км], принимая нулевое значение на длине волны примерно 1270 нм. Эта длина волны λод называется длиной волны нулевой дисперсии для объемной среды. Для оптоволокна эта длина волны сдвигается до значения порядка 1312 нм, чем и объясняется использование источников излучения 1310 нм для одномодового оптоволокна. Для одномодового кварцевого волокна дисперсия групповых скоростей положительна для λ< 1312 нм и отрицательна для λ> 1312 нм, а в окрестности λ=13I2 нм она нулевая.

Для уменьшения материальной дисперсии нужно, с одной стороны, переходить при выборе источников к лазерным диодам, а при выборе волокна предпочтение отдавать одномодовому волокну. С другой стороны, необходимо переходить от источников с длинами волн порядка 850 нм к длинам волн порядка 1310 нм для использования эффекта нулевой дисперсии.

Волноводная дисперсия