

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.

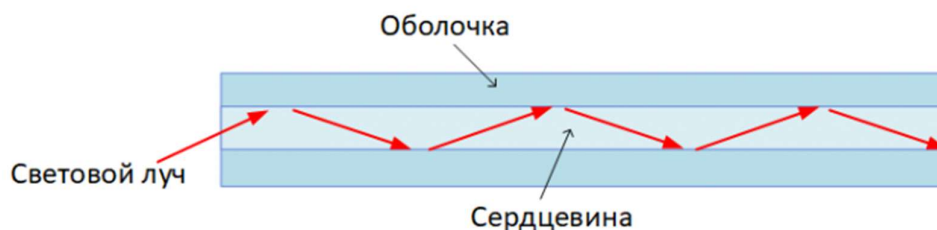


Рисунок 1.1 – Эффект полного внутреннего отражения в оптоволокне

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 длиной 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 нсек/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 не намного 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.

$$\alpha = \alpha_{\text{соб}} + \alpha_{\text{каб}} = \alpha_{\text{рр}} + \alpha_{\text{пм}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{каб}}, \quad (1.1)$$

где $\alpha_{\text{соб}}$ – собственные потери;

$\alpha_{\text{каб}}$ – кабельные потери;

$\alpha_{\text{рр}}$ – потери на рассеяние;

$\alpha_{\text{пм}}$ – потери на поглощение в материале волокна;

$\alpha_{\text{пр}}$ – 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 $\lambda > 1,8$ 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.

$$\left| \frac{dn}{d\omega} \right| \text{ или } \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|,$$

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 ($\frac{dn}{d\omega} > 0$) и аномальной (отрицательной), если n уменьшается с увеличением ω ($\frac{dn}{d\omega} < 0$). 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.

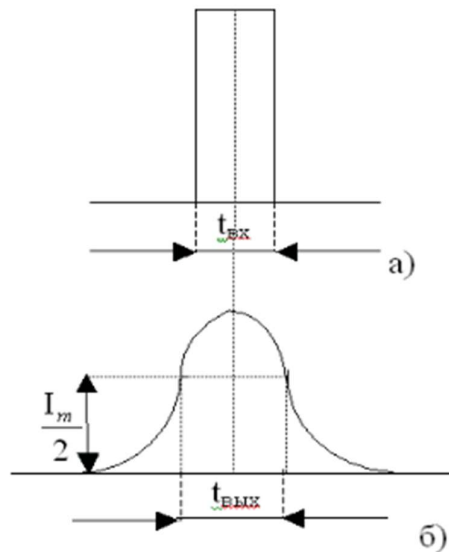


Рисунок 1.2 – Уширение импульса под воздействием дисперсии

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

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}, \quad (1.2)$$

где $t_{\text{вых}}$ – длительность импульса на выходе;

$t_{\text{вх}}$ – длительность импульса на входе.

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

$$\Delta F \approx \tau^{-1}, \quad (1.3)$$

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 зависит 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.

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{\sum R_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (1.4)$$

где ω_j – резонансные частоты,
 R_j – 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 ω_0 . Линейный член этого разложения, или параметр β_1 , характеризует групповую скорость движения огибающей импульса – $V_g = c/n_g$ (где n_g – групповой показатель преломления), а квадратичный член, или параметр β_2 характеризует собственно дисперсию групповых скоростей в волокне, имеющую размерность $[\text{пс}^2/\text{км}]$. Она и определяет уширение импульса. Можно отметить, что в диапазоне длин волн 500-1600 нм β_2 почти линейно уменьшается от +70 до -40 $[\text{пс}^2/\text{км}]$, принимая нулевое значение на длине волны примерно 1270 нм. Эта длина волны $\lambda_{\text{од}}$ 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 $\lambda < 1312$ нм и отрицательна для $\lambda > 1312$ нм, а в окрестности $\lambda = 1312$ 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 отличается от дисперсии объемной среды наличием волноводной структуры, изменяющей эффективный показатель преломления моды. В результате появляется особая волноводная составляющая дисперсии, которая складывается определенным образом с дисперсией материала, формируя результирующую дисперсию. Вклад

волноводной дисперсии зависит от радиуса сердцевины, разности показателей преломления сердцевины и оболочки и числа оболочек. Для описания дисперсии с учетом ее волноводной составляющей вместо параметра β_2 используется дисперсионный параметр D , по формуле 1.5:

$$D = -2\pi c\beta_2/\lambda^2, \quad (1.5)$$

Действие волноводной составляющей дисперсии сдвигает длину волны нулевой дисперсии до величины $\lambda_{0D} = 1312$ нм. Этот факт используется при выборе длины волны источника (1310 нм) для работы с одномодовыми ОВ. Используя несколько слоев оболочки и тем самым изменяя параметры волноводного тракта, можно сдвинуть длину волны нулевой дисперсии в диапазон 1500-1600 нм. Для этого оказалось достаточным использовать две оболочки (рис.1.3, кривая 2) – этот тип оптоволокна получил название оптоволокна со сдвигом дисперсии. Используя многослойную оболочку (рис. 1.3, кривая 3 – оболочка имеет 4 слоя), можно добиться почти плоской и близкой к нулевой дисперсионной характеристики ($|D| \leq 1-6$ пс/км/нм) в диапазоне длин волн от 1300 до 1650 нм. Так появилось волокно с ненулевой (и маломеняющейся) дисперсией.

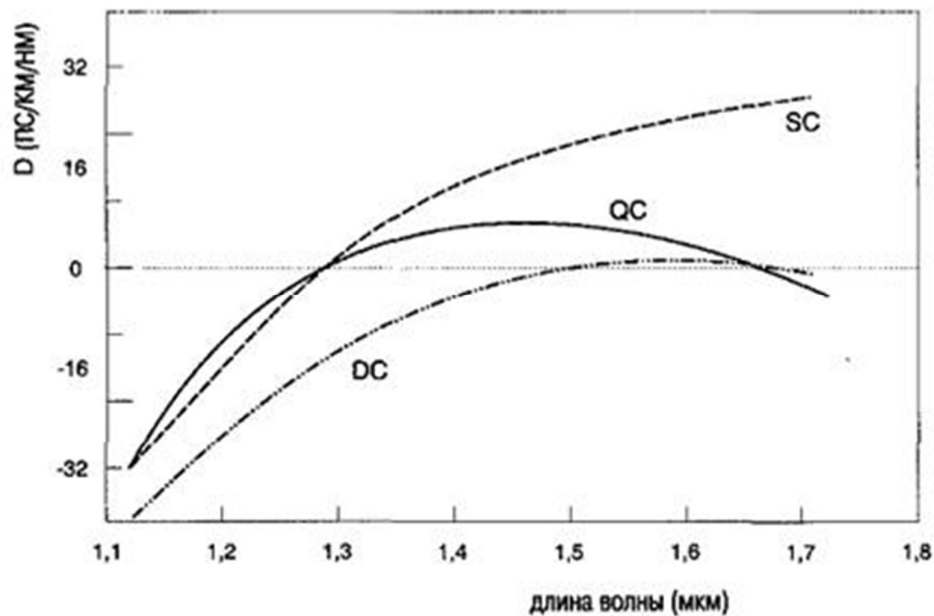


Рисунок 1.3 – Зависимость дисперсионного параметра волокна D от длины волны и числа оболочек: SC - одна оболочка, DC - две оболочки, QC - четыре оболочки

1.2.3 Методы компенсации дисперсии

Методы компенсации разделяют на широкополосные и узкополосные. Узкополосные методы обычно ограничены одним оптическим каналом, и компенсация осуществляется только на одной оптической несущей станции. Широкополосные методы обеспечивают компенсацию в некоторой полосе длин волн на линии.

Методы компенсации разделяются так же на методы с фиксированной (нерегулируемой), с перестраиваемой (регулируемой) и с адаптивной (с динамическим управлением) компенсацией. При фиксированной компенсации фазовые спектральные характеристики используемых устройств не регулируются. Если же параметры фазовых характеристик компенсаторов можно регулировать по величине и длине волны, то такую регулировку относят к методам с перестраиваемой компенсацией. Перестраивают характеристики компенсаторов или на месте их установки, или дистанционно. При адаптивной компенсации обязательно используется обратная связь, которая необходима для формирования (на основе результатов измерений дисперсионных искажений в линии) сигналов управления устройством компенсации с регулируемой фазовой характеристикой.

В зависимости от области применения различают оптические и электронные методы. Оптические методы, как правило, – широкополосные. Электронные методы только узкополосные. Наибольшее распространение получили следующие методы компенсации дисперсии:

- пространственная компенсация с помощью волокна с отрицательной дисперсией;
- компенсация с помощью дискретных рамановских усилителей;
- компенсация дисперсии на модах высшего порядка;
- инверсия спектра в середине линии (обращение волнового фронта);
- динамическая компенсация с помощью управляющей электроники;
- компенсирующие устройства на основе Брэгговской решётки или интерферометра.

Компенсация с помощью включения волокна с отрицательной дисперсией. Один из наиболее распространенных способов компенсации хроматической дисперсии на регенерационном участке - включение по концам усилительных участков (УУ) модулей компенсации дисперсии с компенсирующими оптическими волокнами. Последовательно оптическому волокну линии передачи включают компенсирующее волокно, дисперсия которого имеет противоположный знак. Параметры оптического волокна

выбираются так, чтобы обеспечить компенсацию дисперсии во всем рабочем диапазоне длин волн.

К достоинствам модулей компенсации дисперсии с оптическим волокном с двойным покрытием следует отнести простоту установки и компактность, эффективность использования при реконструкции линии, относительно широкий рабочий спектральный диапазон. Сегодня на рынке представлен большой выбор вариантов исполнения модулей компенсации с оптическим волокном с двойным покрытием для работы с оптическими волокнами различного типа в различных диапазонах. Модуль компенсации включается в линейный тракт как дополнительный элемент и, соответственно, вносит дополнительные потери, помехи и искажения. При типичной длине компенсирующего оптического волокна в модуле 5-10 км, включение каждого модуля увеличивает потери в линейном тракте на 5-6 дБ.

Поскольку модуль компенсации вносит значительные дополнительные потери, оптическое волокно нельзя включать на выходе усилительного участка до предварительного усилителя. Его нельзя включать так же и на выходе линейного оптического усилителя, так как из-за малой площади эффективного сечения оптического волокна высокий уровень оптической мощности приведет к существенному росту нелинейных помех. По этой причине оптическое волокно с двойным покрытием (DCF) включается между каскадами оптических усилителей – между предусилителем и выходным усилителем, как представлено на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Включение компенсирующего оптического волокна между усилителями

Компенсация с помощью дискретных рамановских усилителей. Интересным решением представляется применение для компенсации хроматической дисперсии дискретных рамановских усилителей. Для таких оптических усилителей в качестве среды распространения используются уложенные в бухты длины ОВ с повышенной нелинейностью. Оптическое волокно с двойным покрытием является идеальной средой распространения для дискретного рамановского усилителя. Малая площадь эффективного

сечения и высокая концентрация легирующих добавок обеспечивают приемлемую эффективность рамановского усиления. При этом требуется малая длина DCF – всего несколько километров. Применение DCF в дискретных рамановских оптических усилителях обеспечивает эффективное усиление с компенсацией хроматической дисперсии. Эти усилители называют дискретными компенсирующими рамановскими усилителями – DCRA (Dispersion Compensating Raman Amplifier). Их принцип работы поясняется на рисунке 1.5.

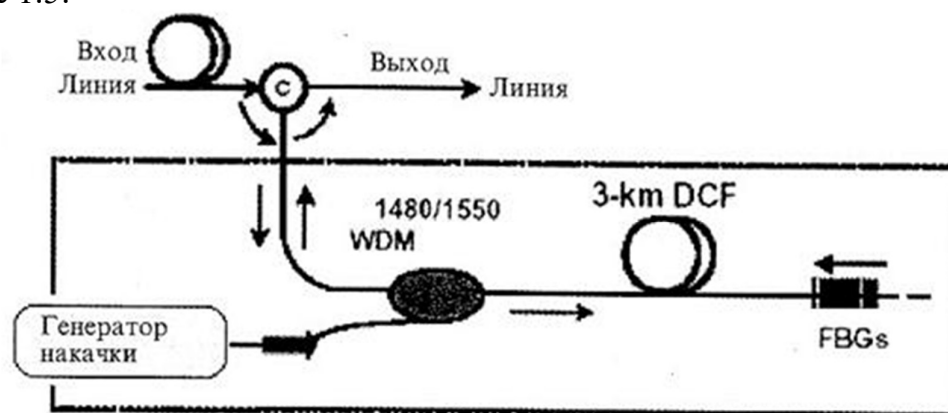


Рисунок 1.5 – Принцип работы дискретных рамановских усилителей

Компенсация с помощью фотонно-кристаллических волокон. В последние годы активно разрабатываются и развиваются технологии производства микроструктурированных оптических волокон. Эти технологии позволяют реализовать оптические волокна с такими характеристиками в заданном диапазоне длин волн, которые невозможно достичь в ОВ традиционной конструкции. Изменяя диаметры отверстий и их расположение, можно в очень широких пределах варьировать характеристики фотонно-кристаллического волокна (ФКВ). В частности, известны разработки с очень большой отрицательной дисперсией (до -1700 пс/(нм·км) на длине волны 1550 нм), и при этом с малыми потерями и увеличенной площадью эффективного сечения (пониженной нелинейностью).

Такие микроструктурированные оптические волокна имеют хорошие перспективы применения в компенсирующих модулях. Получены ФКВ с большой отрицательной дисперсией и повышенной нелинейностью, что определяет эффективность их применения в компенсирующих устройствах. Необходимая длина такого микроструктурированного ОВ при том же коэффициенте усиления более чем на порядок меньше, чем стандартного кварцевого оптического волокна. Более широкие перспективы открывают

возможности управления параметрами и, соответственно, построения на их основе волоконно-оптических устройств с регулируемыми характеристиками.

Компенсация дисперсии на модах высшего порядка. Еще один способ, обеспечивающий снижение дополнительных потерь и влияния нелинейных эффектов, вносимых модулем компенсации хроматической дисперсии – компенсация дисперсии на модах высшего порядка. Известно, что параметр хроматической дисперсии мод высшего порядка по абсолютной величине существенно больше, чем у основной моды. Это позволяет обеспечивать широкополосную компенсацию на всех длинах волн рабочего диапазона при существенно меньших длинах компенсирующего волокна. При этом площадь эффективного сечения для моды более высокого порядка больше, что обеспечивает снижение нелинейных эффектов и затухания в ОВ. Принцип реализации метода поясняет рисунок 1.6.

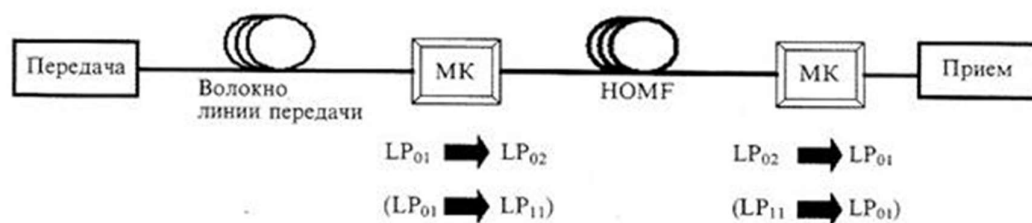


Рисунок 1.6 – Компенсации дисперсии на модах высшего порядка

Распространяющаяся в линии основная мода (LP_{01}) поступает на модовый конвертор, который преобразует ее в моду более высокого порядка LP_{02} или LP_{11} . Конструкция специального оптического волокна для передачи моды высшего порядка (high order mode fiber - HOMF) выполнена так, чтобы обеспечить наилучшие условия для ее распространения и подавить основную моду. На выходе HOMF мода высшего порядка преобразуется модовым конвертором в основную моду и восстановленный сигнал передается дальше в линию.

Метод инверсии спектральной фазовой характеристики передаваемого сигнала. Инвертор спектральной фазовой характеристики включается в регенерационный участок строго посередине. Принцип работы метода поясняется на рисунке 1.7. Составляющие спектра передаваемого сигнала первую половину длины участка проходят с одной скоростью, а вторую – с другой, что обеспечивает выравнивание времени распространения спектральных составляющих сигнала на участке.

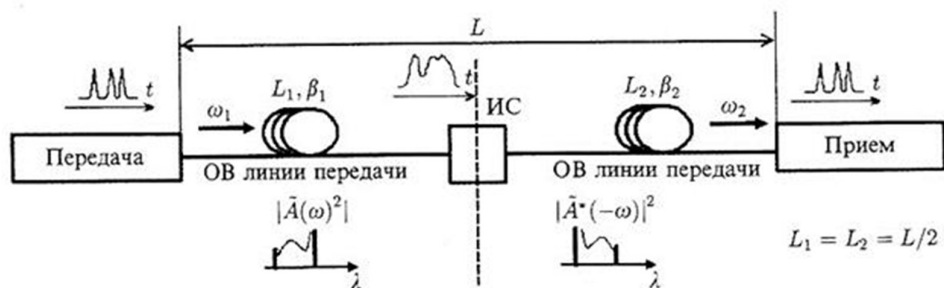


Рисунок 1.7 – Метод инверсии спектральной характеристики

Перестраиваемая компенсация хроматической дисперсии. Общий недостаток перечисленных выше методов компенсации обусловлен большими значениями накапливаемой дисперсии, разбросом характеристик устройств, длин и параметров волокна, температурной нестабильностью, повышенной ПМД.

Методы с фиксированной компенсацией могут обеспечить лишь "грубое" подавление дисперсионных искажений. Для более глубокой компенсации необходима "привязка к месту", что требует дополнительно применения перестраиваемых компенсаторов. Большинство методов с перестраиваемой компенсацией базируются на применении оптических фильтров различного типа. Это – фильтры на основе интерферометра Жире-Турнуа, интерферометра Маха-Цандера, тонкопленочных технологий, а также брегговских дифракционных решеток.

Компенсаторы дисперсии на основе волоконных брегговских решеток благодаря своей конструкции наилучшим образом согласуются с волокном линии передачи. Требуемые значения дисперсии и наклона ее спектральной характеристики обеспечивается путем применения брегговских дифракционных решеток с переменным периодом. Согласованием резонансных частот решетки с сеткой оптических несущих систем удастся обеспечить компенсацию для группы оптических каналов.

Управление периодом решетки позволяет регулировать ее спектральную дисперсионную характеристику. Например, регулируя прикладываемые к волокну механические напряжения (растяжение, сжатие), можно линейно изменять период решетки. Регулируя температуру вдоль волокна, в зависимости от закона ее изменения, можно обеспечить как линейное, так и нелинейное управление периодом решетки.

Адаптивная компенсация хроматической дисперсии. Устройство адаптивной компенсации дисперсии ОВ включает управляемый модуль компенсации, модуль измерения и модуль управления. Известно множество вариантов схем построения модуля измерений, базирующихся на оценивании

различных параметров сигнала. При реализации оптической адаптивной компенсации обычно измеряют параметры хроматической дисперсии на контрольных частотах (длинах волн). Управляемый модуль компенсации использует один из рассмотренных выше методов с регулируемой компенсацией.

Развитие элементной базы позволило реализовать адаптивные схемы электронной компенсации на скоростях до 10 Гбит/с. Компенсаторы строятся на известных принципах линейной и нелинейной фазовой коррекции. Их отличает экономичность и простота реализации. Они легко встраиваются в схему мультиплексора, но для каждого типа мультиплексора нужна своя схема электронной компенсации дисперсии. С увеличением числа оптических каналов системы суммарные затраты на реализацию такого способа растут.

Электронные методы компенсации. Несмотря на прогресс оптических технологий, стоимость оптических устройств все еще высока в сравнении с электронными устройствами. Существует два основных электронных способа борьбы с дисперсией на стороне передатчика:

1 Использование форматов модуляции, устойчивых к влиянию дисперсии. Это позволяет увеличить протяженность линии связи без дополнительных компенсаторов дисперсии.

2 Искусственное предискажение формы передаваемого сигнала таким образом, чтобы на стороне приемника внесенные предискажения и дисперсия волокна взаимно компенсировались.

Использование форматов модуляции, устойчивых к влиянию дисперсии, является одним из наиболее эффективных способов "электронной" борьбы с дисперсией и нелинейными эффектами в волоконно-оптической локальной сети. Применяются также предкомпенсация дисперсии путём искусственного искажения формы сигнала и электронная посткомпенсация, которая заключается в том, что оптический сигнал преобразуется в электрический и подвергается некоторой обработке.

1.2.4 Нелинейные эффекты в оптическом волокне

Отклик любого диэлектрика на световое воздействие становится нелинейным в сильном электромагнитном поле, и оптическое волокно не исключение.

Нелинейные эффекты низшего порядка в оптических световодах возникают из-за восприимчивости третьего порядка, которая ответственна за такие явления, как генерация третьей гармоники, четырехфотонное смешение, нелинейное преломление. Однако, если не созданы специальные условия

фазового синхронизма, нелинейные процессы, связанные с генерацией новых частот (например, генерация третьей гармоники или четырехволновое смещение), в световодах не эффективны. Большинство нелинейных эффектов в волоконных световодах возникают из-за нелинейного преломления (зависимости показателя преломления от интенсивности) как результат вклада, то есть показатель преломления световода определяется по формуле 1.6.

$$\bar{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2, \quad (1.6)$$

где $n(\omega)$ – линейная часть, определяемая формулой 1.4, $|E|^2$ – интенсивность поля внутри волокна и n_2 – нелинейный показатель преломления, связанный с линейной восприимчивостью третьего порядка по формуле 1.7.

$$n_2 = \frac{3}{8n} \chi^{(3)}, \quad (1.7)$$

где $\chi^{(3)}$ – тензор, который может влиять на поляризационные свойства оптического пучка через нелинейное двулучепреломления.

Зависимость показателя преломления от интенсивности приводит к множеству интересных нелинейных эффектов. Два наиболее широко изученных эффекта – это фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ).

ФСМ обусловлена самонаведенным набегом фазы, который оптическое поле приобретает при распространении в оптическом волокне. Его величину можно получить, заметив, что фаза оптического поля изменяется по формуле 1.8.

$$\phi = \bar{n} k_0 L = (n + n_2 |E|^2) k_0 L, \quad (1.8)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ и L – длина световода.

ФКМ обусловлена нелинейным набегом фазы оптического поля, который наведен другим полем на другой длине волны, распространяющимся совместно. Его появление можно понять, представив полное электрическое поле E как представлено в формуле 1.9.

$$E = \left(\frac{1}{2}\right) [E_1 \exp(-i\omega_1 t) + E_2 \exp(-i\omega_2 t) + \text{компл. сопр.}], \quad (1.9)$$

когда два оптических поля на разных частотах ω_1 и ω_2 , поляризованных вдоль оси x , вместе и одновременно распространяются в волокне. Нелинейный набег фазы поля на частоте ω_1 тогда будет рассчитан по формуле 1.10.

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_1|^2 + 2|E_2|^2), \quad (1.10)$$

где мы пренебрегаем всеми членами, возбуждающими поляризацию не на частотах ω_1 и ω_2 , потому что для них отсутствует фазовый синхронизм. Два члена в правой части уравнения 1.10 – это ФСМ и ФКМ соответственно.

Важной характерной чертой ФКМ является то, что для двух полей одинаковой интенсивности вклад ФКМ в нелинейный набег фазы в 2 раза больше, чем вклад ФСМ. Помимо всего прочего ФКМ вызывает ассиметричное спектральное уширение совместно распространяющихся импульсов.

Вышеупомянутые нелинейные эффекты, связанные с восприимчивостью третьего порядка, можно назвать упругим рассеянием света в том смысле, что не происходит обмена энергией между электромагнитным полем и диэлектрической средой. Второй класс нелинейных эффектов вызван вынужденным неупругим рассеянием, при котором оптическое поле передает часть своей энергии нелинейной среде. В эту категорию попадают два важных нелинейных эффекта; оба они связаны с возникновением колебательных мод кварца. Это эффекты вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ); они были среди первых нелинейных эффектов, обнаруженных в оптических волокнах.

Основное различие между этими эффектами состоит в том, что в ВКР принимают участие оптические фононы, тогда как в ВРМБ – акустические. В простой квантовомеханической модели, применимой и к ВКР, и к ВРМБ, фотон падающего поля (часто называемый накачкой) распадается на фотон меньшей (стоксовой) частоты и фонон, имеющий такую же энергию и количество движения, которые соответствуют законам сохранения энергии и количества движения. Конечно, фотон с большей энергией (на так называемой антистоксовой частоте) может возникнуть, если может быть поглощен фонон с надлежащими энергией и количеством движения. Вместе с тем, хотя ВКР и ВРМБ по своей природе очень похожи, различие дисперсионных свойств акустических и оптических фононов приводит к некоторым принципиальным различиям между ними. Основное различие заключается в том, что ВРМБ в волоконных световодах происходит только в обратном направлении, а ВКР преимущественно по направлению распространения.

Полное описание ВКР и ВРМБ в волоконных световодах довольно сложное, но для начального роста стоксовой волны существует простое соотношение. Для ВКР оно дается уравнением 1.11.

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s, \quad (1.11)$$

где I_S – интенсивность стоксовой волны, I_p – интенсивность накачки и g_R – коэффициент ВКР-усиления. Такое же уравнение имеет место и для ВРМБ, если заменить g_R на коэффициент ВРМБ-усиления g_B . Величины g_R и g_B в кварцевых световодах измерены экспериментально. Спектр ВКР-усиления очень широкий, ≈ 30 ТГц. Максимум усиления при длине волны накачки 1 мкм $g_R \approx 1 \times 10^{-11}$ см/Вт и находится на стоксовом частотном сдвиге около 13 ТГц. Наоборот, спектр ВРМБ-усиления очень узкий ≈ 10 МГц. Максимум ВРМБ-усиления находится на стоксовом сдвиге ≈ 10 ГГц и составляет величину около 6×10^{-9} см/Вт для узкой линии накачки. Эта величина уменьшается в $\Delta\nu_p/\Delta\nu_B$ раз в случае, когда накачка имеет широкий спектр; здесь $\Delta\nu_p$ – ширина линии накачки и $\Delta\nu_B$ – ширина линии ВРМБ-усиления.

Важная особенность ВКР и ВРМБ в том, что эти эффекты пороговые, то есть существенное преобразование энергии накачки в энергию стоксовой волны происходит, только когда интенсивность накачки превышает некоторый пороговый уровень. Несмотря на малые величины нелинейных коэффициентов в кварцевом стекле, нелинейные эффекты могут наблюдаться при относительно низких мощностях.

1.3 Классификация и характеристики промышленных оптических волокон

1.3.1 Основные классификационные параметры оптических волокон

Оптические волокна могут быть классифицированы по двум параметрам. Первый – материал, из которого сделано волокно.

Стекланные волокна имеют как стеклянное ядро, так и стеклянную оптическую оболочку. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого сверхпрозрачного диоксида кремния или плавленного кварца. В стекло добавляют примеси, чтобы получить требуемый показатель преломления. Германий и фосфор, например, увеличивают показатель преломления, а бор и фтор, напротив, уменьшают его. Кроме того, в стекле присутствуют другие примеси, не извлеченные в процессе очистки. Они также влияют на свойства волокна, увеличивая затухание, обусловленное рассеянием и поглощением света.

Стекланные волокна с пластиковой оптической оболочкой (PCS) имеют стеклянное ядро и пластиковую оптическую оболочку. Их характеристики, хотя и не столь хорошие, как у полностью стеклянного волокна, являются вполне приемлемыми.

Пластические волокна имеют пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку. По сравнению с другим видами волокон пластиковые имеют ограниченные возможности с точки зрения затухания и полосы пропускания. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным.

Пластиковые и PCS волокна не имеют защитных оболочек вокруг оптической оболочки.

Второй способ классификации волокон основан на индексе преломления ядра и модовой структуре света. На рисунке 1.8 показаны: три основные особенности волокон в соответствии с этой классификацией.

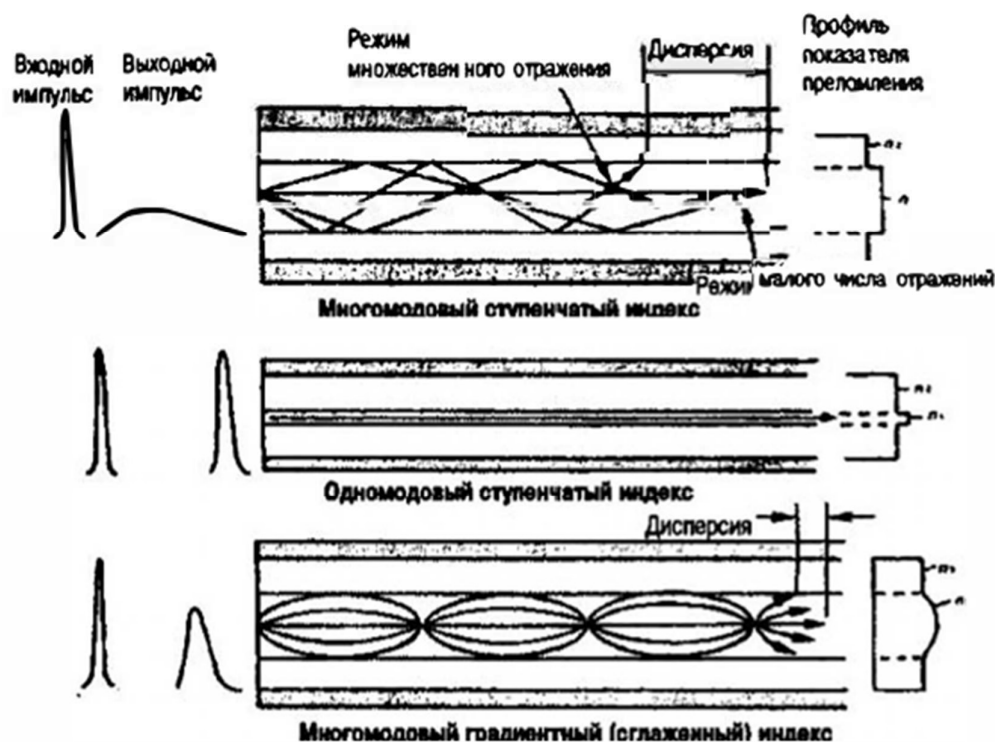


Рисунок 1.8 – Типы распространения света в волокне

Первая особенность – различие входного и выходного импульсов. Уменьшение импульса амплитуды импульса связано с затуханием его мощности. Расширение связано с конечной полосой пропускания волокна и ограниченной информационной емкостью.

Вторая особенность – траектории лучей, возникающих при распространении света.

Третья особенность – распределения значений показателей преломления в ядре и оптической оболочке для различных типов волокон.

1.3.2 Классификация многомодовых оптических волокон