

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОГО
ГРУППОВОГО ПОТОКА В ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу
«Оптические цифровые телекоммуникационные системы»

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. СВЧ и КР

____ С. Н. Шارانгович

___ май 2011 г..

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОГО
ГРУППОВОГО ПОТОКА В ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу
«Оптические цифровые телекоммуникационные системы»

Разработчики

проф. каф. СВЧ и КР

_____ Шارانгович С.Н.

студент гр.114-8 :

_____ Н. П. Глущенко

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	5
3. Расчетная часть.....	21
4. Задание к работе.....	22
5. Контрольные вопросы	23
6. Рекомендуемая литература	24

1 Введение

В настоящее время бурно развиваются волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). Проложены тысячи километров оптических кабелей, в том числе и по дну океанов. Аппаратура телефонной связи перестраивается на использование в линейных трактах оптических кабелей.

Большое внимание к ВОСП вызвано следующими их основными качествами: широкополосностью и высокой пропускной способностью; малым затуханием в широком диапазоне частот; высокой защищенностью от внешних электромагнитных помех; малогабаритностью и легкостью (масса оптических кабелей в 10...12 раз меньше электрических); пригодностью прокладки по реальным трассам. ВОСП радиально решают проблему электромагнитной совместимости особо острую в наше время.

Появление лазеров пробудило интерес к оптическим методам передачи и обработки информации и стимулировало развитие этого направления. По сравнению с излучением обычных источников света лазерное излучение обладает высокой монохроматичностью, а следовательно, когерентностью и имеет большую плотность интенсивности. К достоинствам этих систем связи можно отнести такие, как:

- 1) высокая скрытность связи (ответвление сигнала возможно только при подсоединении к отдельному волокну);
- 2) освоение ранее не используемого для передачи информации участка спектра электромагнитных колебаний (видимый спектр);
- 3) малый диаметр волокна (в среднем не более 100 мкм), малый вес и низкая цена;
- 4) возможность создания оптических кабелей, не обладающих электропроводностью и индуктивностью (это означает, что передаваемые сигналы не подвергаются электромагнитным помехам).

К существующим же недостаткам таких систем можно отнести трудность соединения (сращивания) волокон, низкий КПД и сравнительно высокий уровень шума в приемнике (фотодиоде), частично обусловленный квантовой природой процесса детектирования оптического сигнала, и, конечно, нелинейность излучательных характеристик лазеров.

С развитием ВОСП окончательное оборудование таких систем все более усложняется, что, в свою очередь, требует усложнения вспомогательных устройств для тестирования и проверки различных режимов работы окончательного оборудования. Развитие вычислительной техники позволяет отказаться от аппаратной реализации таких устройств.

Целью данной лабораторной работы является исследование на основе компьютерного моделирования принципов формирования первичного группового потока и вопросов помехоустойчивости в аппаратуре ИКМ-30 и волоконно-оптических цифровых системах передачи.

Лабораторная работы выполняется на основе программы моделирования, разработанной на каф.СВЧиКР с использованием визуальной среды программирования Delphi 4.0 и являющейся приложением Windows.

2 Теоретическая часть

2.1 Обобщенная структурная схема цифровой системы передачи

Исторически аппаратура связи разрабатывалась в основном исходя из аналогового способа передачи информации, в результате чего была создана разветвленная аналоговая сеть связи. Первые ЦСП были созданы лишь 35 лет назад (в начале 60-х годов), когда опыт использования аналоговых систем передачи (АСП) исчислялся уже несколькими десятилетиями. На конец 70-х годов окончное оборудование ЦСП было примерно в два раза дешевле, чем АСП, но при равном числе каналов длина участка регенерации оказывалась в два раза короче длины усилительного участка [1].

С появлением волоконно-оптических линий связи ситуация кардинально изменилась. Длина регенерационных участков увеличилась до (50÷70) км. Развитие ЦСП происходит столь быстрыми темпами и преимущества их настолько очевидны, что в большинстве развитых стран к 2000 году первичная сеть связи будет полностью цифровой.

На первичной сети единой автоматизированной сети связи предусмотрено образование следующих типов цифровых групповых трактов [1]:

- первичного со скоростью передачи $2048 (1 \pm 50 \cdot 10^{-6})$ кбит/с;
- вторичного со скоростью передачи $8448 (1 \pm 30 \cdot 10^{-6})$ кбит/с;
- третичного со скоростью передачи $34368 (1 \pm 20 \cdot 10^{-6})$ кбит/с;
- четвертичного со скоростью передачи $139264 (1 \pm 15 \cdot 10^{-6})$ кбит/с.

Важнейшей характеристикой ЦСП является коэффициент ошибок. Коэффициент ошибок всей системы в целом во многом определяется его величиной на худшем участке регенерации, которым обычно бывает участок наибольшей длины. В ЦСП при увеличении дальности связи за счет установки дополнительных регенераторов достаточно легко обеспечить заданные требования к вероятности ошибки, определяющей качество передачи.

В АСП качество передачи с увеличением дальности связи неизбежно ухудшается.

Другой характеристикой ЦСП является величина искажений сигналов, возникающих в том или ином устройстве или тракте.

В представленной на рисунке 2.1 обобщенной схеме ЦСП следует выделить наиболее важные составные части, которые характеризовали бы основные процессы, протекающие в реальной схеме [1, с.21].

Цикл передачи ИКМ-30 является строго детерминированным, т.е. невозможно произвольным образом изменить структуру служебных сигналов,

коммутировать информационные каналы. Устройство формирования представляет собой 2 блока: блок управления и блок сопряжения.

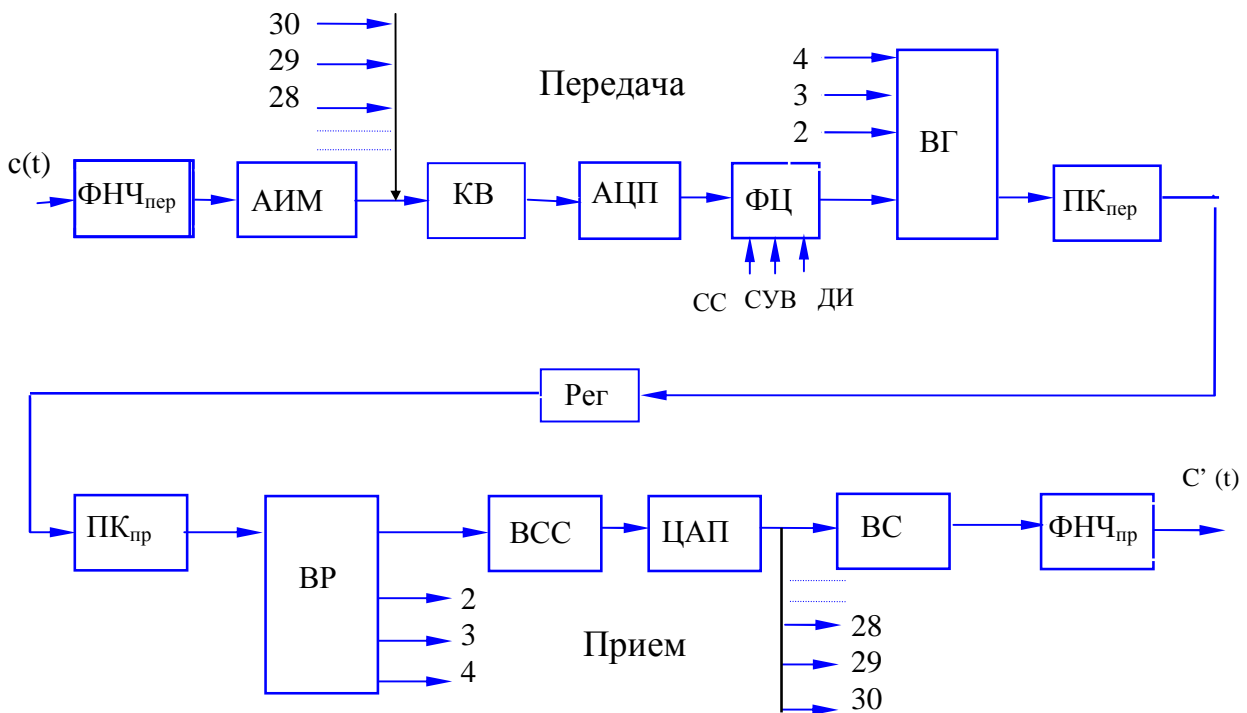


Рисунок 2.1- Обобщенная структурная схема ЦСП

На передаче первичный аналоговый сигнал $c(t)$, представленный в виде синусоиды на рисунке 2.2., ограничивается по спектру с помощью $\Phi НЧ_{пер}$, что позволяет в последующем достаточно просто осуществить дискретизацию сигнала по времени в соответствии с теоремой В.А.Котельникова.

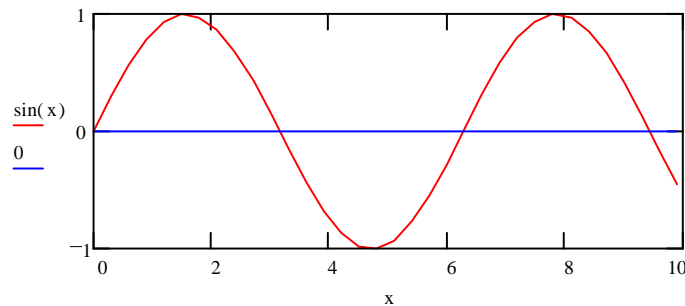


Рисунок 2.2 - Исходный аналоговый сигнал 1-го канала

Уже на этом этапе обработки сигнала возникают искажения сигнала, связанные с тем, что во-первых, исходный сигнал, имеющий в принципе неограниченный спектр, ограничивается по частоте, а во-вторых, нельзя реализовать $\Phi НЧ_{пер}$ с идеальными характеристиками, в результате чего на его выходе формируется сигнал с неидеально ограниченным спектром. Однако ограничение спектра производится с учетом особенностей восприятия того или

иного вида информации и не оказывает существенного влияния на качество передачи информации, а возможные искажения из-за неидеальности ФНЧпер.

(за счет перекрытия по спектру плохо подавленных высокочастотных составляющих исходного сигнала с нижней боковой полосой дискретизированного сигнала) могут быть сведены к минимуму путем соответствующего выбора частоты дискретизации.

После ограничения по спектру аналоговый сигнал подвергается дискретизации по времени в АИМ модуляторе, в результате чего формируется дискретный по времени индивидуальный АИМ сигнал (рисунок 2.3).

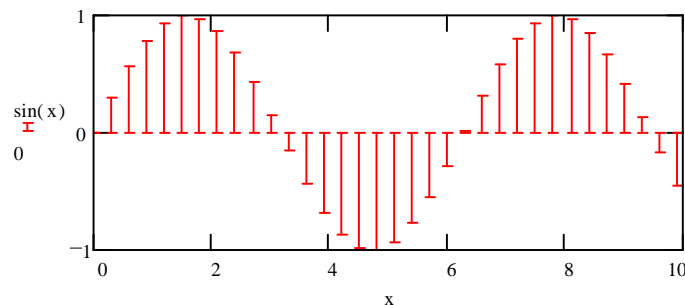


Рисунок 2.3 - Сигнал дискретизированный по времени

На этом этапе обработки сигнала искажения возможны по следующим причинам: во-первых, за счет использования АИМ сигнала с плоской вершиной импульсов, необходимой для нормальной работы последующих устройств, возникают амплитудно-частотные искажения, а во-вторых, из-за случайных смещений моментов дискретизации АИМ отсчеты формируются нерегулярно (неравномерная дискретизация), что приводит к искажениям аналогового сигнала при его восстановлении.

Искажения за счет использования АИМ-2 уменьшаются до требуемого значения путем уменьшения длительности АИМ отсчетов и использования корректирующих устройств.

Дискретизированный по времени индивидуальный сигнал (АИМ сигнал) объединяется с аналогичными сигналами других каналов, т.е. формируется N-канальный АИМ сигнал (АИМгр.), и подвергается квантованию (КВ) по уровню (В ЦСП Соната-У N=30), как показано на рисунке 2.4. При этом возникают шумы квантования, которые во многих случаях являются основными в ЦСП.

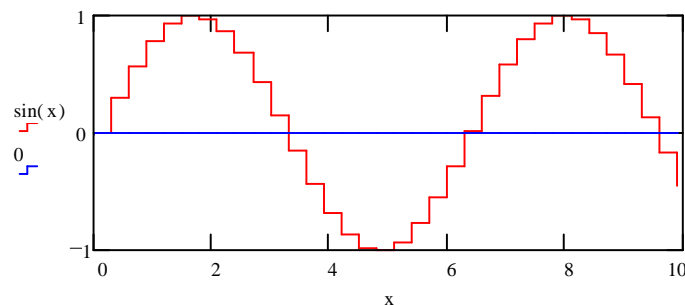


Рисунок 2.4 - Сигнал квантованный по амплитуде

В первый момент времени берут отсчет аналогового сигнала 1-го канала, во второй момент времени отсчет 2-го канала и так далее до тридцатого, получим определенную цифровую последовательность.

Групповой квантованный сигнал (АИМгр.) поступает на кодирующее устройство, где подвергается аналого-цифровому преобразованию (АЦП).

При этом возникают так называемые инструментальные шумы, приводящие к снижению качества передачи информации. Затем групповой информационный цифровой сигнал (ИКМ сигнал) в формирователе цикла (ФЦ) объединяется с сигналами синхронизации (СС), управления и взаимодействия (СУВ) и дискретной информации (ДИ), в результате чего формируется цикл передачи ЦСП.

При использовании высокоскоростных цифровых трактов осуществляется временное группообразование (ВГ), т.е. объединение групповых цифровых потоков с более низкими скоростями (компонентных потоков). При временном группообразовании требуется осуществить согласование скоростей объединяемых потоков, при котором возникают фазовые дрожания цифрового сигнала.

Объединенный высокоскоростной поток в преобразователе кода передачи (ПКпер) преобразуется в сигнал, удобный для передачи по линии, и поступает в цифровой линейный тракт, где в промежуточных пунктах осуществляется регенерация цифрового сигнала (Рег.). В линейном тракте ЦСП качество передачи информации может ухудшиться, в основном, по следующим причинам. При передаче и регенерации цифрового сигнала возникают ошибки, в результате которых на выходе декодера появляются случайные ошибочные выбросы дискретизированного сигнала, вызывающие соответствующие отклонения принимаемого аналогового сигнала от переданного. Частота возникновения таких отклонений, определяемая коэффициентом ошибок, как правило, невелика, но при искажении наиболее значимых символов эти искажения проявляются в виде щелчков на выходе канала.

В большинстве практических систем сигнал тактовой частоты как в линейных регенераторах, так и на приемной станции выделяется из принимаемой импульсной последовательности и поэтому не может абсолютно точно соответствовать тактовой частоте, генерируемой на передающей станции. В результате возникают фазовые дрожания, которые также приводят к искажениям выходного сигнала.

ПКпер для ВОСП содержит следующие элементы (рисунок 2.5):

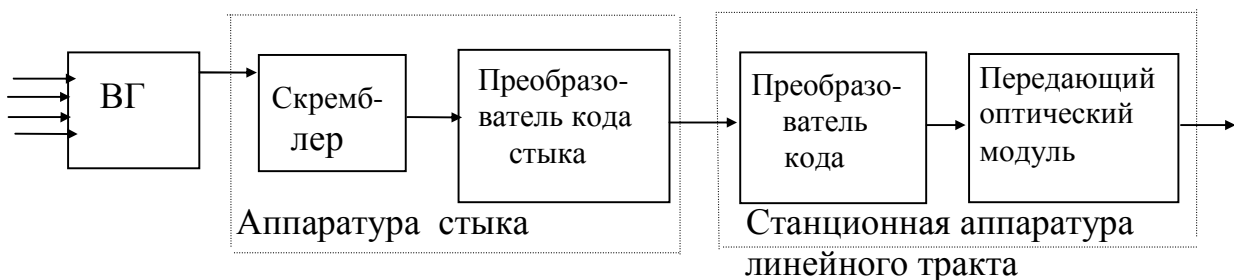


Рисунок 2.5- Оконечная аппаратура цифровой ВОСП

Скремблер преобразует цифровой сигнал по структуре без изменения скорости передачи, т.е. его свойства приближены к свойствам случайного сигнала. Это позволяет достигнуть устойчивой работы линии связи вне зависимости от статических свойств источника информации.

С помощью аппаратуры стыка скремблированный цифровой сигнал может подаваться на вход любой ЦСП. Для каждой иерархической скорости существуют свои коды стыка, например, для первичной-ЧПИ или HDB-3, для вторичной-HDB-3, для четвертичной - СМІ. Операцию преобразования бинарного сигнала, поступающего от аппаратуры ВГ в код стыка выполняет преобразователь кода стыка. Операцию преобразования кода стыка в код ВОСП выполняет преобразователь кода линейного тракта.

Мы рассмотрели передающую часть обобщенной структурной схемы ЦСП. На приеме в преобразователе кода (ПКпр.) осуществляется обратное преобразование кода, применяемого в линейном тракте, в двоичный сигнал. Таким образом, искажения, возникающие в трактах ЦСП, можно разделить на два больших класса:

искажения, возникающие в оконечной аппаратуре в процессе дискретизации и квантования;

искажения, возникающие в линейном тракте (случайные ошибки, фазовые дрожания).

Описанные недостатки ЦСП (ошибки, искажения) в той или иной степени можно уменьшить. Коэффициент ошибок можно минимизировать уменьшая длину регенерационного участка. Неидеальность ФНЧпер компенсируют увеличением частоты дискретизации. Искажения в АИМ модуляторе можно уменьшить уменьшая длительность АИМ отсчетов. Для минимизации шумов квантования в реальных системах используется неравномерное квантование: сжатие (компрессирование) динамического диапазона сигнала и последующее расширение (экспандирование) при приеме. В разработанном устройстве от большинства указанных недостатков ЦСП (кроме ошибок квантования) удастся избавиться за счет того, что сигналы источников генерируются программно в цифровом виде.

Как уже говорилось выше, первичный групповой поток объединяется в блоке ВГ (рисунок 2.1) с другими потоками других каналов, т. е. образуется вторичный групповой поток, который и передается в волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС). На этот вторичный групповой поток в ВОЛС действуют шумы фотодетектора (которые будут рассмотрены в дальнейшем), влияют дисперсия и затухание сигнала. Но так как влияние шумов сказывается только на амплитуду сигнала, то мы будем рассматривать вопрос влияния шумов на первичный групповой поток.

2.2 Краткие сведения из теории и основные расчетные формулы

2.2.1 Основные цифровые методы передачи информации

Рассмотрим основные этапы, связанные с организацией передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), обобщенная структурная схема которой представлена на рисунке 2.1.

Чтобы осуществить такую передачу, необходимо последовательно выполнить ряд операций [3, с.11]:

1) Информационную последовательность, представленную, к примеру, в виде аналогового сигнала, необходимо перевести в соответствии с выбранным кодом - в цифровую форму. Если информационная последовательность уже представлена набором нулей и единиц, то задача упрощается и можно переходить к второму этапу.

2) Необходимо промодулировать оптическое излучение в передатчике в соответствии с полученной информационно-кодовой последовательностью и тем самым на выходе передатчика получить излучение, промодулированное информационным сигналом.

3) Промодулированное излучение ввести через ВОЛС в приемник. За счет потерь в волокне, шумов оконечных устройств (ретрансляторов, блоков питания и т.д.) принятый сигнал сильно и непредсказуемо отличается от передаваемого. Поэтому сигнал необходимо усилить, частотно скорректировать. При этом и синхроимпульс (который, кстати, можно передавать по определенному волокну или в том же волокне) тоже будет претерпевать видоизменения (явление фазового дрожания).

На рисунке 2.2 приведена часть аналогового сигнала. Первый шаг в преобразовании этого сигнала в цифровую форму - определение значений сигнала (отсчетов) через одинаковые интервалы времени, как это показано на рисунке 2.3. В соответствии с теоремой Котельникова, для полного представления аналогового сигнала (рисунок 2.2) дискретным (рисунок 2.3) необходимо, чтобы число отсчетов, равных $1/T$, где T -интервал дискретизации, было по крайней мере в два раза больше наивысшей частоты, содержащейся в спектре дискретизируемого сигнала. Если это условие выполнено, то дискретизируемый сигнал можно восстановить с помощью фильтра нижних частот, пропускающего все частоты ниже некоторой пороговой. Затем этот сигнал квантуется по амплитуде (рис. 2.4).

При этом возникает резонный вопрос о том, какое минимальное количество двоичных чисел в секунду необходимо для представления аналогового сигнала, занимающего полосу частот Δf (Гц) и имеющего динамический диапазон A_s / A_n (где A_s - максимальная величина сигнала, A_n - среднееквадратическое значение шума) в цифровом виде. Часто для такой оценки используют формулу Шеннона:

$$B=2\Delta f \text{Log}_2 [1+(A_s/ A_n)^2]^{1/2}=\Delta f \text{Log}_2 [1+(A_s/ A_n)^2], \quad (2.1)$$

где V - информационно-пропускная способность фотоприемного устройства (ФПУ) (бит/с). Это характеристика канала связи, пригодного для передачи сигнала с полосой Δf при условии, что отношение A_s/A_n не ухудшается.

2.3 Затухание и дисперсия сигналов в волокне

2.3.1 Затухание сигналов в световодах

От затухания оптического кабеля зависит максимальная длина участка между двумя приемопередатчиками. Затухание определяется собственными потерями в волоконных световодах и дополнительными потерями.

Собственные потери волоконных световодов состоят в свою очередь из потерь на поглощение и потерь на рассеяние.

Рассмотрим потери и собственно затухание энергии в световодах. Для заданной скорости передачи информации и вероятности ошибки мощность на входе фотодетектора должна быть больше некоторой определенной величины. Потери волновода определяют длину ретрансляционного участка волоконно-оптической линии связи, то есть 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 металлов переходной группы Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} и ионов ОН. Собственное поглощение наблюдается в ультрафиолетовой (обусловлено электронными полосами поглощения) и инфракрасной (обусловлено колебательными полосами поглощения в компонентах, входящих в состав стекла) областях спектра.

Существенную роль играет рассеяние (переизлучение) энергии. различают линейное и нелинейное рассеяние. 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, называют рэлеевским. Коэффициент рассеяния $K_R = C_R \lambda^{-4}$, где C_R - постоянная, зависящая от материала (для кварца $C_R = 0.6$ мкм⁴ дБ/км). На инородных включениях, содержащих примесь, размер которой сравним с λ , происходит линейное рассеяние Ми. Рассеяние также возникает из-за различных нарушений геометрии световода, наличия соединений, изгибов и микроизгибов.

При достаточно больших передаваемых мощностях могут возникнуть нелинейные процессы, изменяющие параметры материала. Нелинейные эффекты наблюдаются при уровнях мощности порядка 100 мВт в одномодовом и 2.5 Вт в многомодовом волокнах. В ВОЛС обычно используются источники излучения с мощностью порядка десятков милливатт, поэтому нелинейные эффекты не наблюдаются.

Как уже говорилось выше потери в волокне обусловлены его поглощением и рассеянием в процессе распространения по волокну. В нашем случае материал, пригодный для изготовления оптического волокна, должен иметь высокую прозрачность для оптического излучения в области 1 мкм. Фундаментальные потери в стеклах имеют место на краю ультрафиолетовой области спектра, где происходит квантовые переходы, связанные с перестройкой электронных структур атома, и на краю инфракрасной области, которому соответствуют колебания самих атомов в решетке. Значительное влияние на дисперсию и потери в волокне оказывают примеси, которые формируют дополнительный набор резонансных частот волокна.

Микроскопические дефекты в структуре волокна, его изгибы и микроизгибы, а также неупорядоченность структуры стеклообразных материалов ведут к рассеянию света. Здесь речь идет о рэлеевском рассеянии, которое изменяется пропорционально λ^{-4} и составляет около 1 дБ/км в лучших волокнах на длине волны 1 мкм. На рисунке 4.1 изображена зависимость фундаментальных потерь в волокнах их стекла с учетом влияния примесей.

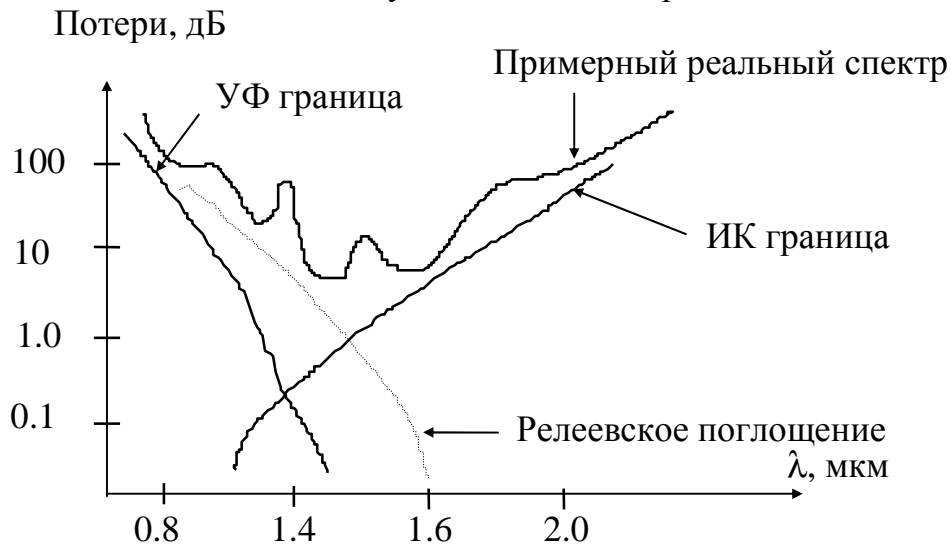


Рисунок 2.6 - Зависимость фундаментальных потерь в волокне от длины волны

При учете эффектов как поглощения, так и дисперсии в волокне выявляются две предпочтительные длины волны: 1.55 мкм, (минимум поглощения) и 1.3 мкм (минимальная дисперсия). Первая используется в одномодовом волокне, возбуждаемом лазерным пучком, вторая же используется в многомодовых градиентных волокнах при возбуждении их некогерентным излучением светодиодов.

Как уже говорилось, важнейшими параметрами световода являются затухание передаваемой энергии и ширина полосы пропускания. Последняя при малых потерях ограничивает длину ретрансляционного участка. В световодах при передаче импульсных сигналов после прохождения некоторого расстояния импульсы расширяются, и наступает момент, когда соседние импульсы будут

перекрывать друг друга. Данное явление носит название дисперсии. Расширение импульсов устанавливает предельные скорости передачи информации по световоду. Ширина полосы пропускания определяется типом световода, существенно зависит от профиля показателя преломления и дисперсии материала, из которого изготовлен световод.

Дисперсия определяется тремя главными факторами: свойствами материала волокна (коэффициент преломления материала волокна является нелинейной функцией частоты), волноводной дисперсией (нелинейной зависимостью постоянной распространения моды от частоты) и межмодовой дисперсией, вызываемой различием групповых скоростей распространяющихся мод. Приведем некоторые численные параметры оптических кабелей для сравнения (см. приложение В).

2.3.2 Материальная дисперсия

На распространение электромагнитных волн в прозрачных материалах оказывает влияние их взаимодействие с молекулами Среды. Поскольку такое взаимодействие зависит от частоты, то и скорость распространения электромагнитных волн также зависит от частоты. При этом говорят, что материал обладает дисперсией. Одним из проявлений дисперсии является уширение коротких световых импульсов при их распространении в диспергирующей среде. Материальная дисперсия ($\tau_2/1$) минимальна на частотах, где наблюдается минимальное фундаментальное затухание. Она может быть изменена с помощью легирующих примесей, используемых для изменения показателя преломления. Значение материальной дисперсии, к примеру, для волокон из кварца на длине волны $\lambda=1.276$ мкм определяется как $(\tau_2/1)=(\gamma^2/8c)\lambda^3 d^3n/d\lambda^3$, где $\gamma=|\Delta\lambda/\lambda|$, а $\Delta\lambda$ определяет расстройку лазерного излучения; c - скорость света. Влияние материальной дисперсии особо заметно в градиентных волокнах.

2.3.3 Совместное влияние материальной и межмодовой дисперсии на длительность импульса

До сих пор мы рассматривали два независимых эффекта: межмодовую дисперсию и дисперсию материала. Оба типа дисперсии изменяют форму импульса, уширяя его. Поэтому возникает вопрос о том, каким образом следует их объединить при определении общей дисперсии оптического волокна. Предположим теперь, что акты уширения воздействующего гауссова импульса под влиянием как межмодовой, так и материальной дисперсии, независимы друг от друга и что каждый из них приводит к появлению видоизмененных импульсов длительностью τ_1 и τ_2 , измеренной на половинном.

Тогда в результате их совместного влияния образуется импульс, который будет оставаться приблизительно гауссовым по форме, а его длительность на уровне $1/2$ выразится как

$$\tau = (\tau_1^2 + \tau_2^2)^{1/2}, \quad (2.7)$$

Если воздействующий на волокно импульс не бесконечно узкий, а обладает конечной длительностью τ_0 , то результирующий импульс будет иметь длительность:

$$\tau = (\tau_0^2 + \tau_1^2 + \tau_2^2)^{1/2}, \quad (2.8)$$

где τ_0 -первоначальная длительность импульса, τ_1 -уширение импульса, обусловленное влиянием только одной межмодовой дисперсии, а τ_2 -уширение за счет материальной дисперсии. Часто для удобства используют значения материальной и межмодовой дисперсии, нормированные на длину линии, т. е. τ_1/l , τ_2/l , где $[l]=\text{км}$, при этом формула (4.2) преобразуется к виду

$$\tau = [(\tau_0^2/l^2) + (\tau_1/l)^2 + (\tau_2/l)^2]^{1/2} l, \quad (2.9)$$

где τ характеризует результирующий импульс.

На практике межмодовая дисперсия оказывается преобладающей в составе полной дисперсии для градиентных и ступенчатых волокон, если последние возбуждаются лазерным пучком.

Не менее важной мерой длительности импульса является его среднеквадратическая длительность σ , которая используется при неизвестной форме импульса, т. е.

$$\sigma^2 = (1/\epsilon) \int_{-\infty}^{\infty} t^2 \Phi(t) dt - t_0^2, \quad (2.10)$$

где ϵ -полная энергия импульса, равная

$$\epsilon = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) dt, \quad (2.11)$$

$\Phi(t)$ -функция распределения мощности в импульс, t_0 -среднее время прихода импульса, равное

$$t_0 = (1/\epsilon) \int_{-\infty}^{\infty} t \Phi(t) dt. \quad (2.12)$$

По сути σ является импульсной характеристикой волокна, так как она обратно пропорциональна его информационно-пропускной способности B :

$$B = 1/4\sigma. \quad (2.13)$$

Наличие дисперсии в волокне ограничивает ее информационно-пропускную способность.

Рассмотрим дисперсию сигнала в одномодовых световодах. В одномодовых световодах распространяется только одна мода HE_{11} , и уширение импульса определяется дисперсией материала и волноводной дисперсией. Последние обусловлены тем, что источники излучения излучают не на фиксированной длине волны, а в узкой полосе длин волн.

Пусть $S(\lambda)$ - спектральное распределение мощности источника, λ_c - средняя длина волны излучения. Тогда $S_0 = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda$ - полная мощность источника и

$$\sigma_\lambda = \left[\int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_c)^2 S(\lambda) d\lambda \right]^{\frac{1}{2}} / S_0$$

- среднеквадратическая ширина спектральной линии источника.

Для световодов $\sigma_\lambda = 15 \div 100$ нм, для лазеров $\sigma_\lambda = 0.1 \div 4$ нм, т. е. для лазерных источников благодаря узкой полосе излучаемых частот дисперсия сказывается меньше, чем при использовании светодиодов.

Для одномодовых световодов с малой апертурой ($\Delta \ll 1$) среднеквадратическое значение уширения импульса при $z=L$ определяется выражением

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\sigma_\lambda}{\lambda} L \left[\lambda \frac{d\tau}{d\lambda} \right] = \frac{\sigma_\lambda}{\lambda} L \left[M\lambda + \frac{N_1 - N_2}{c} V \frac{d^2 V b}{dV^2} \right], \quad (2.14)$$

где $M = -\frac{1}{c} \frac{dN_1}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$ - удельная материальная дисперсия, зависящая от состава стекла; $N_j = n_j - \lambda \frac{dn_j}{d\lambda}$ - групповой показатель преломления. Для сердечника $j=1$, для оболочки $j=2$.

Зависимости показателей преломления плавленого кварца от длины волны представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1- Зависимости показателей преломления (1-группового N , 2-сердечника n) кварца от длины волны

λ , мкм	0.5	0.75	0.1	1.25	1.5	1.75
1	1.49	1.468	1.463	1.462	1.463	1.465
2	1.461	1.455	1.45	1.447	1.445	1.442

Материальная дисперсия $M\lambda$ для кварцевых стекол, легированных GeO_2 и B_2O_3 , показана в таблице 2.2.

Таблица 2.2- Материальная дисперсия для кварцевых стекол

λ , мкм	0.8	1.0	1.2	1.4
$M\lambda(\text{SiO}_2\text{-GeO}_2)$, нс/км	115	60	23	-5
$M\lambda(\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3)$, нс/км	90	40	8	-25

В выражении (2.14) первое слагаемое определяется дисперсией материала, второе - волноводной дисперсией.

В диапазоне длин волн $\lambda = 0.8 \div 0.9$ мкм преобладает дисперсия материала и

$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_\lambda L(M) = \sigma_\lambda \frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$. В длинноволновом диапазоне $\lambda = 1.1 \div 1.6$ мкм, необходимо учитывать и волноводную дисперсию.

Производная в формуле (2.14) в области одномодового режима ($V=2-2.4$) изменяется от 0.2 до 0.05. В диапазоне длин волн $\lambda=0.8-0.9$ мкм преобладает дисперсия материала и $\sigma_{вн} = (\sigma\lambda / \lambda) LM\lambda$.

В длинноволновом диапазоне $\lambda=1.1-1.6$ мкм, необходимо учитывать и волноводную дисперсию.

Полная среднеквадратичная ширина импульсной характеристики

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{меж}}\sigma_{\text{меж}} + \sigma_{\text{вн}}\sigma_{\text{вн}})}$$

2.4 Помехоустойчивость ВОСП

Цифровой оптической системой связи называют устройство, в котором поток данных (в двоичной системе счисления) передается путем модуляции оптического излучения таким образом, что излучаемая энергия во время передачи одного бита равна какому-либо из двух уровней: высокому или низкому.

Реальная система связи отличается от идеальной следующим:

- а) время передачи бита информации не остается постоянным; этот эффект называют фазовым дрожанием цифрового сигнала;
- б) излучаемая оптическая энергия не остается одной и той же при передаче как каждой единицы, так и каждого нуля, поэтому будет иметь место шум передатчика, приводящий к случайным изменениям амплитуды сигнала от импульса к импульсу;
- в) конечная длительность излучаемых импульсов и дополнительная временная дисперсия в процессе их распространения приводит к тому, что часть энергии, относящаяся к периоду передачи определенного бита, в действительности поступает во время передачи соседних битов. Этот эффект называют взаимными помехами между символами (межсимвольные помехи).

Эти и другие эффекты увеличивают критичность процесса регенерации цифрового сигнала в блоке принятия решения.

Прежде чем переходить к обсуждению природы квантовых шумов сигнала и их влияния на качество передачи, остановимся на некоторых общих характеристиках помех оптического диапазона. Как и в любых других системах связи, помехи можно разделить на внешние, возникающие на входе приемника вместе с полезным сигналом, и внутренние, возникающие в цепях приемника. В оптическом диапазоне характерно заметное перераспределение значимости отдельных видов как внешних, так и внутренних шумов [5].

Если в радиотехническом диапазоне часто очень большую роль играют внешние аддитивные шумы, создаваемые разнообразными источниками электромагнитных помех, в оптическом диапазоне влиянием помех, внешних по отношению к световодной линии, можно пренебречь. Это является важнейшим достоинством оптической связи.

Существуют, однако, флуктуационные помехи теплового излучения, поражающие волноводные системы даже в случае их идеальной экранировки от

внешних полей. В согласованной с оконечными нагрузками волноводной системы в каждой моде распространяется флуктуирующее поле теплового излучения. Спектральная плотность этого излучения в соответствии с теорией Планка определяется формулой

$$G(f) = hf / [\exp(hf / kT - 1)] , \quad (2.15)$$

где $h=6.624 \cdot 10^{-34}$ Вт·с/Гц - постоянная Планка; $k=1.379 \cdot 10^{-23}$ Вт/к·Гц - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура, К. Характер зависимости (2.15) иллюстрирует рисунок 2.7 .

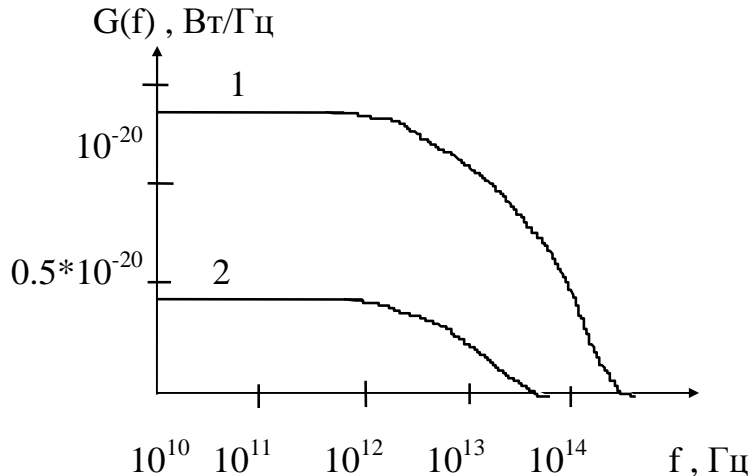


Рисунок 2.7- Спектральная плотность теплового излучения:

1- при $T=1000\text{K}$; 2- при $T=300\text{K}$

В радиотехническом диапазоне , где при обычных значениях T выполняется неравенство $hf \ll kT$, формула упрощается. Раскладывая экспоненту в ряд

$$e^{\frac{hf}{kT}} = 1 + \frac{hf}{kT} + \frac{1}{2} \left(\frac{hf}{kT} \right)^2 + \dots$$

и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получаем известное в радиотехнике выражение плотности теплового шума (белый шум):

$$G(f)=kT. \quad (2.16)$$

Мощность помехи в приемнике

$$P_T=kTB \quad (2.17)$$

зависит от полосы пропускания тракта B , обычно ограничиваемой фильтрами приемника, согласованными со спектром сигнала. При этом предполагается работа приемного устройства на единственной моде.

Естественно, что прием многомодовых сигналов, да еще с расширенной полосой частот, что характерно для оптических систем связи , привел бы в радиотехническом диапазоне к существенному возрастанию шумов. Иное дело- оптический диапазон, где выполняется противоположное неравенство $hf \gg kT$. В соответствии с (2.20) здесь имеет резкий спад $G(f)$ с увеличением частоты. Легко показать, что тепловым излучением можно пренебречь даже в многомодовых системах и без полосовой фильтрации оптического сигнала на входе детектора.

В соответствии с (2.20) и с учетом неравенства $hf \gg kT$ получаем

$$P_T = \frac{N_{\text{пр}} \cdot B \cdot h \cdot f}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \approx N_{\text{пр}} \cdot B \cdot h \cdot f \cdot e^{-\frac{hf}{kT}}, \quad (2.18)$$

где $N_{\text{пр}}$ - число световодных мод.

Поделив (2.18) на энергию фотона hf , можно найти интенсивность потока фотонов. Задавшись температурой $T=300\text{K}$, длиной волны $\lambda=0.85$ мкм, числом мод $N_{\text{пр}}=10^3$ и считая, что спектр ограничивается шириной полосы чувствительности фотодиода $B \approx 10^{14}$ Гц, получаем интенсивность потока фотонов $J \approx 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, т.е. приблизительно 1 фотон за 3 года.

Итак, установлено еще одно качество, которое является достоинством оптического диапазона. Если в радиотехническом диапазоне аддитивный тепловой шум, поступающий на вход приемного устройства, является фундаментальным фактором, ограничивающим потенциальные возможности систем связи (дальность связи при заданных скорости передачи, мощности передатчика, километрическом затухании, включая верность воспроизведения), в оптических системах световодной связи этот шум можно вообще не учитывать. Фундаментальные ограничения здесь ставит квантовый шум.

Таким образом, основными помехами в оптическом диапазоне, внешними по отношению к приемнику, являются помехи, создаваемые нестабильной работой источников излучения на передающей стороне, помехи, возникающие в связи с дисперсионными явлениями, и квантовый шум. Иногда проявляются мультипликативные помехи, вызванные, например, изменениями параметров световодов при механических вибрациях. В разветвленных световодных линиях с многими абонентскими устройствами могут возникать и перекрестные оптические помехи. Однако фундаментальные ограничения качеству передачи в оптическом диапазоне возникают только из-за квантового шума. Все остальные помехи можно, по крайней мере в принципе, теми или иными средствами свести к сколь угодно малым значениям.

Обычная (классическая) теория связи строится на представлениях о непрерывных электромагнитных полях, распространяющихся от передатчика к приемнику сигналов. Непрерывной считается и энергия, поглощаемая приемником из поступающего на его вход электромагнитного поля. Такое представление естественно и оправдано в радиодиапазоне, где энергия элементарного сигнала всегда на много порядков больше энергии кванта электромагнитного поля hf . При переходе в оптический диапазон с увеличением частоты f энергия кванта (фотона) становится сравнимой с энергиями принимаемых сигналов.

В процессе взаимодействия оптического сигнала с фотодетектором выявляются его дискретные свойства. Результатом детектирования является поток элементарных событий, заключающихся в преобразовании фотонов в одноэлектронные импульсы фототока. В соответствии с принципами квантовой механики этот процесс оказывается случайным, содержащим “квантовый шум”.

Квантовый шум N_Q возникает из статистического подсчета фотонов. Квантовый шум описывается формулой

$$N_Q = 2eB \left(\eta \frac{eP}{hf} \right), \quad (2.19)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

B - ширина полосы, Гц;

$\eta = 0.8$ - квантовая эффективность фотодетектора;

$P = 1$ мВт - оптическая мощность.

Строгий подход к описанию указанных явлений требует, вообще говоря, привлечения квантовой теории электромагнитного поля, органически учитывающей его двойственную природу: волновую (непрерывную) и квантовую (дискретную). В то же время для наших целей описания и анализа каналов связи вполне адекватным является полуклассический подход. Он состоит в том, что при распространении оптических сигналов, их линейных преобразованиях типа суммирования, фильтрации и т.п. поле оптического сигнала описывается в терминах классической теории и принимается непрерывным. Дискретность же учитывается на стадии описания взаимодействия поля с детектором.

Ясно, что наличие других помех- внешних, о которых уже говорили, и внутренних снижает помехоустойчивость приема.

Обсудим несколько источников шума, которые наряду с искажением формы сигнала накладывают основные ограничения на передатчик. Источники шума можно классифицировать следующим образом: собственные потери лазерного источника; шумы токораспределения; шумы, появляющиеся от взаимодействия источника и волокна. Так как возникновение шума имеет вероятностную природу, то для его исследования должны использоваться статистические методы оценки, связанные с проблемой организации связи.

Один из основных источников шума, известного как дробовый шум, вызван током инжекции. Другие шумы возникают из-за спонтанной рекомбинации носителей внутри активного слоя и статистической природы вынужденной эмиссии.

Кроме собственного шума и искажения формы сигнала существуют шумы токораспределения и флуктуации мощности, возникающие из-за взаимодействия лазера с волокном. Шумы токораспределения появляются вследствие флуктуации между различными излучающими модами. Они отсутствуют, если лазер генерирует только в одномодовом продольном режиме.

Чем сильнее выражены корпускулярные (квантовые) свойства излучения, тем больше роль квантового шума, тем сильнее выражены волновые (классические) свойства излучения, тем больше роль теплового шума.

2.4.1 Оценка требуемой помехозащищенности регенератора

В процессе регенерации цифрового сигнала вследствие его искажений при передаче по линии и воздействия отмеченных помех возникают ошибки. Коэффициент ошибок на одном участке регенерации должен быть таким, чтобы результирующий коэффициент ошибок на всю линию передачи не превышал допустимых значений [1, с.130].

Причиной возникновения ошибок при передаче цифрового сигнала являются помехи, описанные выше, если их мгновенные значения превышают допустимые пределы в момент принятия решения при восстановлении (регенерации) сигнала. При этом в процессе регенерации цифрового сигнала в результате принятия ошибочного решения символ 1 может быть восстановлен как символ 0, а символ 0 - как символ 1, т. е. происходит трансформация передаваемых символов.

В большинстве практических случаев можно считать, что помехи, действующие в цифровых линейных трактах, имеют нормальное (гауссовское) распределение с нулевым средним значением, т. е.

$$W(U_{\Pi}) = \frac{1}{\sigma_{\Pi} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{U_{\Pi}^2}{2\sigma_{\Pi}^2}\right), \quad (2.20)$$

где U_{Π} , σ_{Π} - мгновенное и среднеквадратическое значение напряжения помех соответственно.

Для безошибочной регенерации цифровых сигналов необходимо выполнять определенные требования к отношению сигнал-шум (S/N) на входе решающего устройства (РУ) регенератора. Отношение сигнал-шум и коэффициент ошибок являются главными параметрами для нахождения вероятности воспроизведения приемника оптической системы.

Очевидно, в этом случае наиболее эффективным было бы использование для передачи двоичного сигнала элементов $S_1(t)$ (для передачи двоичной единицы) и $S_2(t)$ (для передачи двоичного нуля), изображенных на рисунке 2.7.

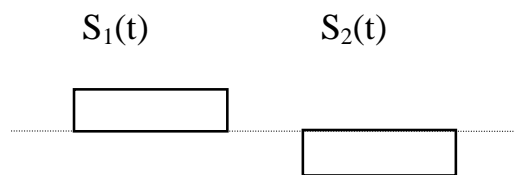


Рисунок 2.7-Элементы двоичного сигнала

В этом случае (рисунок 2.7) при выборе порога в РУ равным нулю ($U_{\text{пор}}=0$) при регенерации импульса ошибка произойдет только тогда, если в момент принятия решения помеха будет иметь обратную полярность, а ее амплитуда окажется больше амплитуды импульса U_m . Если обозначить вероятность ошибочной регенерации символа 1 (т. е. вероятность трансформации 1 в 0) через $P(1/0)$, а вероятность ошибочной регенерации 0 через $P(0/1)$, то общая вероятность ошибки может быть определена как

$$P_{\text{ош}} = P_1 P(1/0) + P_0 P(0/1) = P_1 P(U_{\Pi} < -U_m) + P_0 P(U_{\Pi} > U_m), \quad (2.21)$$

где P_1, P_0 - вероятности появления двоичных сигналов 1 и 0 соответственно.

Если принять, что $P_1=P_2=0.5$, а на входе РУ регенератора действует помеха а гауссовским распределением вида (рисунок 2.15), то

$$P_{\text{ош}}=0.5P(U_{\text{п}}<-U_m)+ 0.5P(U_{\text{п}}>-U_m)=P(U_{\text{п}}>U_m)=\frac{1}{\sigma_{\text{п}}\sqrt{2\pi}} \int_{U_m}^{\infty} \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma_{\text{п}}^2}\right)dU_{\text{п}}=$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U_m}{\sigma_{\text{п}}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{2}\right)dU_{\text{п}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}\sigma_{\text{п}}}\right), \quad (2.22)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ -дополняющий интеграл вероятности.

Отношение S/N возрастает с увеличением среднеквадратичной мощности. Чем выше S/N , тем ниже вероятность появления ошибок в системе. Т. е., чтобы уменьшить коэффициент ошибок [6, с.251], необходимо значительно увеличить мощность сигнала. В приближении Гаусса коэффициент ошибок (BER) есть:

$$\text{BER}=\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(Q), \quad (2.23)$$

где $Q=\frac{1}{2} \cdot \frac{S}{N}$. На рисунке 2.8 приведена зависимость функции распределения коэффициента ошибок от Q .

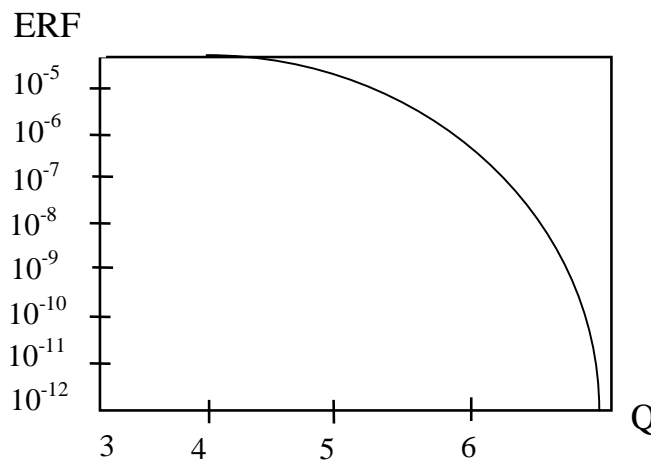


Рисунок 2.8 - Зависимость функции распределения коэффициента ошибок от Q

Таким образом, при оценке помехоустойчивости регенератора следует учитывать целый ряд факторов, приводящих к снижению помехоустойчивости регенератора.

3 Расчетная часть

1. По данным таблицы 2.1 и 2.2 постройте зависимость показателей преломления от длины волны и зависимость материальной дисперсии от длины волны.

2. Определите величину межмодовой дисперсии в параболическом световоде без учета связи мод, если показатель преломления в центре сердцевины $n_1=1.4665$, показатель преломления оболочки $n_2=1.452$, радиус сердцевины $a=25\text{ мкм}$, длина световода $L=1\text{ км}$.
Для параболического световода
 $\sigma_{\text{меж}}=0.14\Delta\Delta L$ мкс,
где $\Delta=(n_1-n_2)/n_2$.
3. Определить полную среднеквадратичную ширину импульсной характеристики в градиентном многомодовом световоде с параболическим профилем показателем преломления без учета связи мод, если длина световода $L=1\text{ км}$, рабочая длина волны $\lambda=0.84\text{ мкм}$, среднеквадратичная ширина спектральной линии источника $\sigma_\lambda=10\text{ нм}$. Параметры световода приведены в примере 2. Величину $\sigma_{\text{меж}}$ рассчитайте в примере 2.
4. Рассчитайте длину регенерационного участка ВОЛС для передачи 120 телефонных каналов с помощью аппаратуры ИКМ-30 при использовании в качестве источника излучения лазера с $\sigma_\lambda=10\text{ нм}$, $\lambda=0.84\text{ мкм}$, в качестве приемника излучения р-і-п диода, в качестве световода-параболического световода с параметрами, приведенными в примере 3. Строительная длина кабеля $L_{\text{сд}}=800\text{ м}$.
 - а) Для аппаратуры ИКМ-120
 $F_T=8.448\text{ МГц}$, $V=8.448\text{ Мбит/с}$.
 - б) Полное среднеквадратичное уширение импульсов на длине 1 км рассчитайте в примере 3.
 - в) Для ИКМ модуляции $V<0.25/\sigma$. Отсюда $\sigma<0.25/V$.

4 Задание к работе

1. Ознакомьтесь с аналитическим обзором рассматриваемой темы.
2. Выполнить расчетное задание.
3. Прodelать лабораторную работу в следующей последовательности:
 - 3.1 Введите параметры АЦП-ЦАП (меню “Параметры”).
 - 3.2 Выберите вид сигнала, например “Гармонический”.
 - 3.3 Введите все необходимые параметры сигнала.
 - 3.4 Сформируйте сигнал и запустите передачу.
 - 3.5 Выберите вид шума, добавьте шум, введите необходимые параметры шума и начните прием сигнала.
 - 3.6 Прodelайте все выше изложенные пункты для каждого вида сигнала, добавляя к каждому из сигналов шум поочередно.
 - 3.7 Подберите параметры сигналов и шумов таким образом, чтобы коэффициент ошибок был минимальным.
 - 3.8 Зарисуйте качественно все графики и запишите все полученные результаты для одного из сигналов в таблицу 4.1.

Таблица 4.1-Полученные результаты

Коэффициент ошибок						
Белый шум, В						
Тепловой шум, К						
Квантовый шум, МГц						

3.9 Сделайте выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные этапы при передаче, приеме и регенерации сигналов в ВОЛС.
2. Какая характеристика определяет эффективность ввода оптического излучения?
3. Как влияет дисперсия на световой импульс ?
4. Какие основные механизмы потерь в волокне влияют на информационно-пропускную способность ВОЛС?
5. Объясните отличие межмодовой от материальной дисперсии.
6. Возможно ли свести к нулю материальную дисперсию?
7. Объясните понятие затухания энергии сигнала.
8. Какие шумы фотодетектора вы знаете?
9. Какой шум фотодетектора является фундаментальным фактором? Почему?
10. Что такое коэффициент ошибок? Как можно его уменьшить?

Список использованных источников

1. Скляров О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.
2. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
4. Оптические цифровые телекоммуникацион-ные системы: учебно-методическое пособие по практическим занятиям// Коханенко А.П., Шарангович С.Н. / Под ред. С.Н. Шаранговича – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. -78 с.

5. Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию // Коханенко А.П., Шарангович С.Н. / Под ред. С.Н. Шаранговича – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. -120 с.
6. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи: Учеб. пособие для вузов / И.Р. Берганов, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев.-М.: Радио и связь, 1989.-272с.
7. Вычислительный эксперимент “ Изучение факторов, влияющих на информационно- пропускную способность волоконно-оптических линий связи”: Методические указания / А.П. Коханенко, А.С. Мягков, Б.Н. Пойзнер.- Томск: ТГУ, 1997.-21с.
8. Волоконно-оптические линии связи: Учеб. пособие для вузов/ Л.М. Андрушко, И.И. Гроднев, И.П. Панфилов.-М.: Радио и связь, 1985.-136с.
9. Волоконо-оптической системы передачи: Учебник для вузов/ М.М. Бутусов, С.М. Верник, С.л. Галкин и др.; Под ред. В.Н. Гомзина.-М.: Радио и связь , 1992.-416с.
- 10.П.К. Чео. Волоконная оптика: Приборы и системы: Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1988.-280с.
- 11.А.А. Акаев, С.А. Майоров. Оптические методы обработки информации.- М.: Высшая школа., 1988г.