



А.Е. Мандель

**Методы и средства
измерения
в волоконно-оптических
системах связи**

А.Е. Мандель

Методы и средства измерения в волоконно-оптических системах связи

Учебное пособие

Рекомендовано
Сибирским региональным отделением
учебно-методического объединения высших учебных заведений РФ
по образованию в области радиотехники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
для межвузовского использования в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
Радиотехника –210300 и Телекоммуникации – 210400

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники

А.Е. Мандель

**Методы и средства измерения в
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Учебное пособие

по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах» для направления подготовки Телекоммуникации – 210400, специальность 210401 – Физика и техника оптической связи»

УДК 681.7.068(075.8)

Рецензенты:

Доктор техн. наук, профессор Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики

Горлов Н.И.

Доктор техн. наук, профессор института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Тихомиров А.А.

Мандель А.Е.

Методы и средства измерения в волоконно-оптических телекоммуникационных системах: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 120 с.

Изложены основные понятия и теоретические основы методов измерения параметров волоконно-оптических линий связи. Рассмотрены принципы построения средств измерений, используемых в волоконной оптике. Приведены методики измерений основных параметров волоконно-оптических линий связи, их отдельных волоконно-оптических и оптоэлектронных компонентов.

Учебное пособие по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах» предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлению подготовки Телекоммуникации – 210400, специальность 210401 – Физика и техника оптической связи» очной, заочной, очно-заочной форм обучения.

© Мандель А.Е., 2012

© Томский гос. университет систем
управления и радиоэлектроники, 2012
Учебное издание

Оглавление

Предисловие	5
1. Классификация измерений волоконной оптики	
1.1. Основные понятия и определения	6
1.2. Виды контроля физических величин волоконно-оптических систем передачи	9
1.3. Основные контрольно-измерительные операции	11
1.4. Основные виды измерений в волоконной оптике	12
1.5. Измеряемые параметры оптического волокна	12
1.6. Основные измеряемые параметры и характеристики источников оптического излучения	14
1.7. Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств	16
1.8. Системные измерения	23
1.9. Основные измерения в многоволновых системах передачи	23
1.10. Измеряемые параметры оптических усилителей	24
2. Измерение оптической мощности	
2.1. Измерение абсолютной оптической мощности	26
2.2. Измерители мощности с термофотодиодами	28
2.3. Измерители мощности с фотодиодами	30
2.4. Принципы построения измерителей оптической мощности	33
2.5. Измерение затухания	35
3. Измерение числовой апертуры	41
4. Измерение диаметра модового поля	46
5. Измерение длины волны отсечки одномодовых волокон	48
6. Измерение спектральных характеристик	
6.1. Анализ оптического спектра	52
6.2. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри — Перо	53
6.3. Анализаторы оптического спектра на основе дифракционной решетки	58
6.4. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток	66
6.5. Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны	69

6.6. Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением	70
7. Измерение дисперсии	
7.1. Виды дисперсии	75
7.2. Межмодовая дисперсия	75
7.3. Измерение межмодовой дисперсии	77
7.4. Хроматическая дисперсия	81
7.5. Измерение хроматической дисперсии	83
7.6. Поляризационная модовая дисперсия	87
7.7. Измерение поляризационной модовой дисперсии	88
8. Измерение коэффициента ошибок в цифровых волоконно-оптических системах передачи	
8.1. Нормы на параметры ошибок систем передачи	90
8.2. Анализаторы коэффициента ошибок	93
8.3. Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок	96
9. Измерение дрейфа и дрожания фазы	
9.1. Общие положения	99
9.2. Измерение фазового дрожания цифровым осциллографом	100
9.3. Измерение фазового дрожания фазовым детектором	101
9.4. Тестирование допустимого фазового дрожания	102
10. Методы и средства волоконно-оптической рефлектометрии	
10.1. Метод обратного рассеяния	105
10.2. Устройство и основные характеристики рефлектометров	110
11. Контроль волоконно-оптических сетей связи	115
Список литературы	119
Рекомендуемая литература	119

Предисловие

В настоящее время интенсивное развитие волоконно-оптических систем передачи является одним из основных направлений научно-технического прогресса. Волоконно-оптические системы связи обеспечивают доставку чрезвычайно большого объема информации с наивысшей скоростью на значительные расстояния, служат основой для развития единой цифровой сети интегрированного обслуживания (телефонной и телеграфной связи, телевидения, передачи данных и т.д.).

Характеристики волоконно-оптических систем передачи определяются параметрами волоконно-оптических и оптоэлектронных компонентов, структурой системы передачи, архитектурой сети. В связи с этим современные волоконно-оптические системы требуют сложной процедуры измерений при их прокладке, настройке и техническом обслуживании, применения большого количества разнообразных средств измерений, в том числе узкоспециализированных. Это выдвигает на первый план задачи совершенствования и стандартизации измерительных технологий, организации комплекса мер по обеспечению требуемой точности и единообразия измерений.

В настоящем пособии приводится систематизированный материал по методам и средствам измерения основных параметров волоконно-оптических систем передачи, их отдельных волоконно-оптических и оптоэлектронных компонентов.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности 210401 «Физика и техника оптической связи».

Приведенный список литературы позволит желающим глубже изучить интересующие их вопросы.

Автор

1. Классификация измерений волоконной оптики

1.1. Основные понятия и определения

Рассмотрим основные понятия и определения системы метрологического обеспечения в телекоммуникациях [1, 2].

Физическая величина — одно из фундаментальных научных понятий — определяет в количественном и качественном отношении свойство физических объектов или физических систем. Следует различать истинное и действительное значения физической величины. Первое идеальным образом отражает в качественном и количественном отношении свойство объекта. Второе находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. Значение физической величины, выраженное в установленных единицах, носит название *меры*.

В телекоммуникациях передача информации осуществляется посредством сигналов, распространяющихся в оптической среде. Поэтому в дальнейшем под физической величиной будем подразумевать как физические величины, определяющие среду распространения, так и сигналы, распространяющиеся в той или иной форме в оптической среде.

Измерение — определение опытным путем с помощью специальных технических средств значений физических величин, параметров или характеристик устройств. Измерения бывают прямые и косвенные, абсолютные и относительные.

Прямым называется измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Уравнение прямого измерения:

$$y = cx,$$

где y — значение измеряемой величины в принятых для нее единицах; x — отсчет по измерительному устройству в делениях шкалы или непосредственный отсчет по цифровому отсчетному устройству; c — цена деления шкалы или единичного показания цифрового отсчетного устройства.

Косвенным называется измерение, при котором искомое значение величины z находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, определяемыми прямыми измерениями. Уравнение косвенного измерения имеет вид

$$z = f(x, y, a, b, \dots),$$

где x, y — измеряемые величины; a, b, \dots — физические константы и постоянные измерительного устройства.

Абсолютным называется измерение, результат которого есть значение измеряемой величины в единицах принятой системы. Например, измерение мощности светового пучка — в ваттах, энергии — в джоулях.

Относительным измерением называется количественное сравнение двух однородных величин. Это позволяет установить, насколько или во сколько раз одна величина больше или меньше другой.

Значение физической величины, полученное путем ее измерения, называется *результатом измерения*. Основной характеристикой результата измерения является *точность*. Точность измерения определяется таким понятием, как *погрешность измерения* отклонения результата измерения от действительного значения измеряемой величины. Погрешность измерения обусловлена погрешностью средства измерения и методики измерения.

В ряде случаев для количественного определения числового значения дискретной величины независимо от параметров этой величины используется термин *счет*. Результатом счета является неименованное число.

Принципом измерения называется совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, при измерении энергии импульса светового излучения в основу могут быть положены различные принципы измерения: тепловой, фотоэлектрический, пондемоторный и т.д.

Методом измерения называется прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с принципом, положенным в основу измерения. Методы измерения осуществляются средствами измерения.

Средствами измерения называются технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства.

Другим понятием, часто используемым совместно с измерением, является контроль. *Контролем* будем считать процесс установления соответствия между состоянием или свойствами объекта (или процесса) заданной норме. (Под нормой мы будем понимать область в пространстве состояний физического объекта или процесса.) Результатом контроля является качественная характеристика — вывод о нахождении объекта контроля вне нормы или в норме. Контроль может быть аудио, визуальный или осуществляться с помощью технических средств устройством или системой контроля. Измерения и контроль имеют ряд различий:

- 1) результатом измерения является количественная характеристика объекта; результатом контроля — качественная;
- 2) измерение осуществляется в широком диапазоне измеряемой величины; контроль выполняется в ограниченной области состояний контролируемого параметра;
- 3) основной характеристикой измерения является погрешность измерения; основной характеристикой процесса контроля — достоверность результата контроля (т.е. соответствие или несоответствие значения контролируемой величины заданной норме).

В то же время, если норма реализована в мере, то результатом контроля является результат измерения. Таким образом, измерение обязательно предшествует контролю и может быть включено в понятие «контроль».

В телекоммуникациях наряду с понятиями «измерение» и «контроль» используется понятие «тестирование». *Тестированием* называется процесс установления опытным путем соответствия между состоянием или свойством физической величины и заданной нормой, осуществляемый с помощью технических средств, хранящих единицу или множество единиц этой физической величины. Результат тестирования показывает соответствие или несоответствие физической величины заданной норме. Основной характеристикой тестирования является достоверность, которая из-за наличия процедуры измерения определяется таким понятием, как погрешность тестирования.

Особое место в области контроля в телекоммуникациях занимает понятие «анализ протоколов» передачи данных. Под *протоколом* понимается набор правил или стандартов, кото-

рые упорядочивают соединение и обмен информацией в телекоммуникациях, сводя к минимуму ошибки. В системах связи правила и стандарты закодированы соответствующими сигналами или их комбинациями, поэтому анализ протоколов можно рассматривать как операции над физическими величинами, а именно кодовыми сигналами — с помощью специальных технических средств. Результат анализа протоколов является качественной характеристикой и выражается в виде: соответствует или не соответствует норме обмен информационными сигналами в процессе соединения при передаче данных в системе связи. Основной характеристикой анализа протоколов является достоверность анализа, которая из-за наличия измерительных процедур определяется понятием «ошибка анализа».

В соответствии с определением метода измерения можно сформулировать и понятия метода тестирования и метода анализа протоколов. *Метод тестирования* — это прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее нормой. В основе метода тестирования лежит физическое явление или эффект, на котором работает средство тестирования. *Метод анализа протоколов* — прием или совокупность приемов нахождения равнозначности физической величины заданной норме. В основе метода лежит физический процесс соединения и обмена информационными сигналами, который положен в основу анализа протоколов техническим средством анализа.

1.2. Виды контроля физических величин волоконно-оптических систем передачи

Контроль в телекоммуникациях включает в себя измерения, тестирование, анализ протоколов. Эти операции осуществляются над физическими величинами, такими как механические, акустические, электрические, магнитные, оптические и другие. При этом все виды контроля в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) можно разделить на две группы:

- 1) прямой контроль, который выполняется в единицах контролируемой физической величины;

2) косвенный контроль, который выполняется на основе прямого контроля физических величин, связанных с искомой физической величиной функциональной зависимостью.

Как прямой, так и косвенный контроль может осуществляться для одной или множества аналоговых, дискретных и кодированных величин. В обоих случаях результатом контроля будет соответствие контролируемой величины установленным нормам или равнозначность заданной норме.

При определении абсолютных или относительных значений параметров физических величин или их отклонений от установленных норм контроль называется количественным. При оценке результата контроля по принципу «годен — не годен» контроль называется допусковым.

С временной точки зрения контроль может осуществляться одновременно или разновременно, причем разновременно с последовательной, параллельной или случайной последовательностью выбора контролируемых физических величин.

Следует различать и пространственный фактор контроля. С этой точки зрения контроль может быть односторонним, двусторонним или многосторонним.

Для контроля функционирования ВОСП могут быть использованы образцовые внешние сигналы, например сигналы генераторов. В этом случае контроль называется активным. В случае отсутствия внешних воздействий контроль называется пассивным.

По режиму выполнения контроля следует различать ручной, автоматический, автоматизированный режимы контроля. Первый осуществляется только техническим персоналом, второй — при частичном участии персонала, третий — без участия персонала.

При организации контроля само контролирующее оборудование может быть расположено непосредственно у объекта или удалено от него на некоторое расстояние. Поэтому различают локальный и дистанционный контроль. Частным случаем дистанционного контроля является централизованный контроль, при котором управление процессом и получение результатов контроля сосредоточено в одном месте.

Контроль может осуществляться по одной или множеству величин. С этой точки зрения различают элементарный и комплексный контроль. Эти виды контроля различаются числом используемых технических средств и методиками измерения, счета, тестирования и анализа протоколов.

1.3. Основные контрольно-измерительные операции

Контроль в телекоммуникациях включает процедуры измерений и тестирования, которые совместно используются при технологическом контроле и эксплуатационных испытаниях.

С целью установления соответствия контролируемых параметров ожидаемым или допустимым значениям в телекоммуникациях могут выполняться следующие контрольно-измерительные операции [2, 3].

1. Настрочные (инсталляционные) измерения. Производятся при первоначальной настройке каналов и трактов. Целью этих измерений является контроль на соответствие настроенным нормам. Настрочные измерения выполняются строго последовательно. Эта последовательность определяется взаимозависимостью работы настраиваемого оборудования.

2. Приемосдаточные измерения. Их назначение заключается в проведении полного объема измерений на соответствие установочным нормам. Результат измерений отражается в техническом паспорте.

3. Профилактические измерения. Выполняются в процессе эксплуатации системы передачи на соответствие эксплуатационным нормам.

4. Внеплановые измерения. Являются составной частью ремонтно-восстановительных работ. На заключительном этапе могут входить как в настроенные, так и в приемосдаточные измерения.

Под настроенными и эксплуатационными нормами здесь понимаются те значения параметров и характеристик системы передачи, при которых обеспечивается требуемое качество ее работы. В процессе эксплуатации системы качество ее функционирования снижается из-за дестабилизирующих факторов (например, изменяются потери в оптоволокне). Поэтому эксплуатационные нормы, как правило, менее жесткие, чем установочные, но должны соответствовать удовлетворительному качеству связи в любое время между профилактическими настройками. Установочные нормы наиболее жесткие и определяются как минимальные отклонения параметров и характеристик оборудования, каналов и трактов системы передачи от номинальных значений, регламентируемых соответствующими стандартами.

1.4. Основные виды измерений в волоконной оптике

Измерения в ВОСП можно условно разделить на два основных типа [1]:

- 1) аппаратурные измерения;
- 2) системные измерения.

Аппаратурные измерения проводятся для отдельных элементов ВОСП: оптического волокна, приемного и передающего модулей, оптических усилителей. Примерами аппаратурных измерений являются измерения затухания в оптическом волокне, дисперсии, числовой апертуры и т.п.

Системные измерения связаны с определением способности ВОСП функционировать в целом как система и включают измерение таких характеристик ВОСП, как непрерывность волокна, энергетический потенциал линии связи, коэффициент ошибок (BER), дрейф и дрожание фазы и т.п.

1.5. Измеряемые параметры оптического волокна

В ВОСП используются многомодовые и одномодовые оптические волокна. В системах передачи на основе многомодовых волокон наиболее важными измеряемыми параметрами оптического волокна являются следующие [1, 4].

1. *Затухание оптического волокна* — параметр, характеризующий ослабление мощности оптического сигнала при его распространении в волокне, обусловленное поглощением в материале сердцевины и рассеянием излучения на неоднородностях материала.

2. *Дисперсия* — технический термин для обозначения расширения светового импульса при его распространении в волокне (сужения полосы пропускания) вследствие рассеивания во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала.

3. *Числовая апертура* — один из важнейших измеряемых оптико-геометрических параметров волокна, определяющий значение оптической мощности, которое можно ввести в волокно.

4. *Диаметр сердцевины* — параметр, наряду с числовой апертурой определяющий значение оптической мощности,

которое можно ввести в многомодовое волокно. Данный параметр в обязательном порядке измеряется в процессе производства оптических кабелей и всегда может быть получен у изготовителя. Наиболее характерные размеры многомодовых волокон (стандартизованное соотношение диаметров сердцевины и оболочки, принятое в большинстве стран и в нашей стране) в микрометрах: 50/125, 80/125, 90/125, 100/140, 100/200, 100/250, 125/200, 200/230, 200/250, 250/375.

В системах передачи на основе одномодовых волокон измерению подлежат параметры, аналогичные рассмотренным выше для многомодовых волокон: затухание оптического волокна, дисперсия, числовая апертура. Необходимо отметить, что измерение затухания в одномодовом волокне проще, чем в многомодовом. По меньшей мере один фактор, влияющий на воспроизводимость результатов измерений, наличие многих мод, каждая из которых имеет собственную характеристику ослабления, отсутствует. Полоса пропускания одномодовых волокон, в свою очередь, зависит в основном от хроматической дисперсии, поэтому для ее определения влияние модовой дисперсии можно не принимать в расчет.

Наряду с вышеуказанными в ВОСП на основе одномодовых световодов дополнительно измерению подлежат параметры, свойственные только одномодовым оптическим волокнам.

1. *Длина волны отсечки* — параметр одномодового волокна, определяющий самую короткую длину волны, которую следует использовать, если особую важность имеет полоса пропускания. При более коротких длинах волн в волокне будет распространяться большее количество мод.

2. *Диаметр модового пятна* — параметр, характеризующий распределение интенсивности светового поля в поперечном сечении на выходе волокна.

3. *Поляризационная модовая дисперсия* — параметр, характеризующий расширение светового импульса при его распространении в волокне. Проявляется в одномодовых волокнах и обусловлена нециркулярностью (эллиптичностью) сердцевины и анизотропией, вызванной наведенными механическими напряжениями.

1.6. Основные измеряемые параметры и характеристики источников оптического излучения

Излучатели — источники оптического излучения, предназначенные для преобразования электрического входного сигнала в выходной оптический. Известны два основных класса излучателей, пригодных для использования в технике оптической связи: светодиоды (СД) и полупроводниковые лазеры (ЛД).

Светодиоды изготавливают в основном по арсенид-галлиевой технологии. Они генерируют некогерентное излучение, используемое, главным образом, для передачи по многомодовому волокну на длинах волн $\lambda = 850$ нм и 1300 нм. Типовая выходная мощность СД порядка 1 мВт, ширина спектра излучения, измеренная в точках спектра с половинной мощностью, составляет 20–80 нм. У светодиодов достаточно большая апертура излучения, что ведет к значительным потерям при вводе света в оптическое волокно — до 10–17 дБ. Быстродействие СД невысоко, полоса частот модуляции не превышает 1 МГц. СД характеризуется почти линейной зависимостью мощности излучения P_n от тока возбуждения I_n (рис. 1.1).

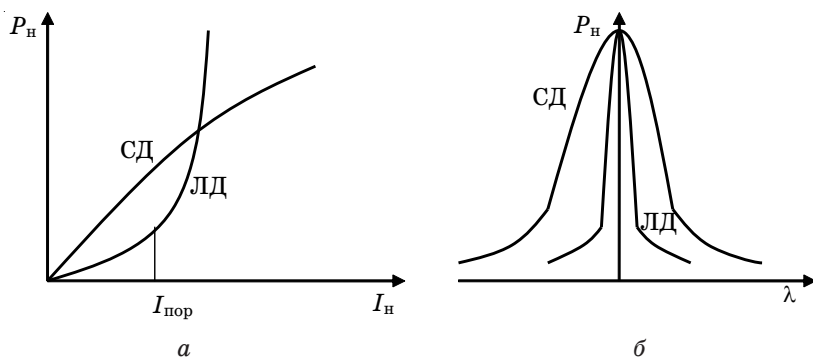


Рис. 1.1. Энергетические (а) и спектральные (б) характеристики полупроводникового лазера и светодиода: $I_{\text{пор}}$ — пороговый ток; λ — длина волны излучения; P_n — нормированная мощность излучения

Принципиальным отличием лазерных диодов от светодиодов является наличие в них встроенного оптического резонатора. Полупроводниковый лазер, в отличие от светодиода,

генерирует близкое к монохроматическому излучение со спектральной шириной 1–5 нм, работает на длинах волн $\lambda = 1300$ нм, $\lambda = 1550$ нм и используется для передачи информации по одномодовому кабелю. Меньшая ширина спектральной характеристики ведет к снижению дисперсионных искажений передаваемого сигнала. Быстродействие современных лазеров позволяет модулировать их излучение с частотой до 10 ГГц и выше. Типовая выходная мощность излучения составляет около 5 мВт. Апертура полупроводникового излучателя при работе в лазерном режиме значительно меньше, чем у светодиодов, что при прочих равных условиях позволяет ввести в волокно большую мощность. Потери на ввод излучения ЛД обычно не превышают 2–5 дБ. Зависимость мощности излучения P_n от тока накачки I_n у лазеров имеет ярко выраженный пороговый характер (см. рис. 1.1,а).

При создании лазерных передатчиков приходится решать ряд сложных инженерных задач, обусловленных следующими особенностями лазера:

- для уменьшения времени задержки и, следовательно, для увеличения быстродействия лазерного передатчика рабочая точка в состоянии покоя должна находиться вблизи излома энергетической характеристики;

- величина порогового тока $I_{\text{пор}}$, при котором начинается лазерная генерация, сильно зависит от температуры кристалла излучателя и возрастает с течением времени из-за эффектов его старения;

- большая крутизна энергетической характеристики при токах, превышающих пороговое значение, в сочетании с низкой стойкостью лазера к перегрузкам требует контроля выходной мощности излучения.

Все это приводит к необходимости применения в электронных схемах лазерных передатчиков сложных цепей регулирования и стабилизации с использованием мониторингового фотодиода, что существенно усложняет передающий лазерный оптоэлектронный модуль по сравнению со светодиодным.

При использовании светодиодов и полупроводниковых лазеров в системах передачи подлежат измерению следующие основные параметры и характеристики источников излучения [1, 4, 5].

1. *Ватт-амперная характеристика* (зависимость выходной мощности излучения от тока накачки). По измерениям этой характеристики может быть определен коэффициент передачи (отношение мощности светового излучения к протекающему через диод току) и оценена нелинейность преобразования.

2. *Полоса частот модуляции*. Эти измерения позволяют оценить быстродействие источников излучения.

3. *Центральная длина волны и ширина спектра излучения*. Эти параметры определяются по спектральному распределению мощности излучения. Результаты их измерений важны, поскольку позволяют оценить влияние дисперсии на передачу импульсов. Кроме того, для когерентных систем необходимы лазеры, излучающие одну продольную моду. Для таких систем измерения спектра излучения приобретают большое значение.

4. *Размер излучающей области и пространственное распределение мощности*. Эти два параметра необходимы для обеспечения эффективности соединения источника излучения с волокном.

1.7. Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств

Фотоприемное устройство (ФПУ) является составной частью линейного тракта ВОСП. Оно входит в состав оконечных и промежуточных обслуживаемых и необслуживаемых пунктов линии связи. В фотоприемном устройстве происходит преобразование оптического сигнала в электрический сигнал и его усиление. При необходимости в ФПУ могут быть включены схемы обработки сигнала, позволяющие получить параметры сигнала, при которых аппаратура, подключенная к выходу ФПУ, может нормально функционировать.

Типичная функциональная схема фотоприемного устройства с прямым детектированием приведена на рис. 1.2.

Оптический соединитель осуществляет ввод излучения в ФПУ и согласование с приемником излучения. Преобразование оптического сигнала в электрический в ФПУ осуществляется фотоэлектрическим полупроводниковым приемником

излучения. Усиление, необходимое для восстановления уровня сигнала и достижения максимально возможного при данных условиях отношения сигнала к шуму, обеспечивают усилители, входящие в состав ФПУ. После усилителя сигнал поступает в схему цифровой обработки (в цифровых ВОСП) или к потребителю информации (в аналоговых ВОСП).



Рис. 1.2. Схема фотоприемного устройства

Из множества фотоприемных преобразователей излучения наибольшее распространение в ВОСП получили быстродействующие *pin*-фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). Они хорошо стыкуются со световодом, имеют высокую квантовую эффективность, позволяют получать малое время фотоотклика. Спектральный диапазон приборов в основном определяется материалом. Для изготовления фотодиодов *pin*-структуры наиболее часто используемым материалом в области, близкой к инфракрасной (850 нм), является кремний (Si). Фотодиоды *pin*-структуры на длину волны, превышающую 1 мкм, выполняют из германия (Ge) или арсенида галлия (InGaAs и InGaAsP). ЛФД изготавливают на основе Si, InGaAs, InGaAsP. Структура ЛФД совмещает в себе свойства *pin*-диода и обычного лавинного диода, позволяя получать значительное усиление фототока при сохранении высокой квантовой эффективности и быстродействия. По сравнению с *pin*-фотодиодом, ЛФД позволяет выйти в порог чувствительности, работает в меньшем диапазоне температур, но требует повышенного напряжения питания. При использовании ЛФД в качестве фотодетектора можно изменять подаваемое на него напряжение обратного смещения и таким путем регулировать коэффициент лавинного умножения (усиления) фотодиода. Это позволяет существенно расширить

динамический диапазон ФПУ, но требует наличия блока автоматической регулировки усиления (АРУ). Лавинные фотодиоды, имеющие за счет эффекта внутреннего умножения на порядок более высокую чувствительность, чем *pin*-диоды, находят применение в линиях связи большой протяженности. В локальных системах высокая чувствительность является излишней, и оптические приемники аппаратуры построены исключительно на *pin*-диодах.

Фотоприемное устройство, имеющее единое конструктивное оформление, называется приемным оптическим модулем (ПрОМ). Модули бывают аналоговыми и цифровыми. Аналоговые модули, как правило, не содержат схем обработки сигнала и состоят из оптического соединителя, фотоприемника, предварительного усилителя и схемы стабилизации режимов приемника. Цифровые модули включают в себя декодирующие устройства или преобразователи кодов. ФПУ при этом может быть составлено из набора специализированных блоков, часть из которых или все являются унифицированными. В настоящее время промышленность выпускает приемные оптические модули различной степени интеграции.

Основными метрологическими параметрами приемников излучения являются чувствительность, уровень собственных шумов, отношение сигнал/шум, пороговая мощность.

Чувствительность фотодиода представляет собой отношение изменения уровня сигнала на выходе приемника, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения, представленной любой энергетической или фотометрической величиной. Чувствительность к монохроматическому излучению заданного спектрального состава называется интегральной чувствительностью $S_{\text{и}}$. В тех случаях, когда рассматривается реакция приемника на монохроматическое излучение, говорят о монохроматической чувствительности. Для приемников ВОСП обычно указывается монохроматическая чувствительность по току S_{λ} (А/Вт). Монохроматическая чувствительность может быть абсолютной и относительной. В последнем случае величина абсолютной монохроматической чувствительности нормируется на максимум спектральной чувствительности.

Шумы являются неотъемлемой составляющей практически любого электронного устройства, в том числе и ФПУ. Ос-

новными видами шумов, имеющих место в *pin*-диодах и ЛФД, являются следующие: дробовой, тепловой, генерационно-рекомбинационный, радиационный.

Усилительные электронные приборы, входящие в состав ФПУ, такие как транзистор, также имеют много источников шума, более сложных по своей природе. Уровень шумов транзистора зависит от его материала и конструкции, а также от характера смещения *p-n*-перехода. Шумы, возникающие в электронной схеме ФПУ или ее элементе, накладываются на любые сигналы, проходящие через цепь.

Метрологически важным является уровень собственных шумов ФПУ, который можно оценить по уровню сигнала на выходе ФПУ при отсутствии оптического сигнала на входе. В этом случае основными слагаемыми собственных шумов ФПУ будут шумы, вызванные темновым током фотодиода, и шумы, возникающие в электронной схеме усилителя.

Отношение сигнал/шум есть отношение значения полезного сигнала I на выходе ФПУ к уровню собственных шумов ФПУ $I_{\text{ш}}$:

$$K = \left| \frac{I}{I_{\text{ш}}} \right|. \quad (1.1)$$

На практике отношение сигнал/шум ограничивается максимальным уровнем полезного сигнала, пришедшего на ФПУ, а также уровнем шума, превышающим теоретический из-за влияния различных паразитных наводок, плохой экранировки элементов и т.д. Шум, вызванный током сигнала, также может быть значительным, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум приемного устройства. Отношение сигнал/шум является важным метрологическим параметром приемников излучения, поскольку именно оно определяет качество канала связи.

Пороговая мощность — минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе ФПУ, при которой обеспечивается номинальное отношение сигнал/шум для аналоговых ФПУ или номинальное выходное напряжение логических состояний для цифровых ФПУ. Измеряется пороговая мощность в ваттах или децибелах по отношению к 1 мВт.

Основными характеристиками ФПУ являются характеристика преобразования, спектральная, частотная и переходная

характеристики. Эти характеристики соответствуют номинальному электрическому режиму и постоянной температуре.

Спектральная характеристика отражает зависимость монохроматической чувствительности от длины волны регистрируемого потока излучения. Типичный пример спектральных характеристик *pin*-диодов приведен на рис. 1.3.

Характеристикой преобразования фотоприемника называют зависимость интегральной или спектральной чувствительности фотоприемника от интенсивности засветки. Абсолютная спектральная чувствительность (коэффициент преобразования) не остается строго постоянной в широком рабочем диапазоне изменения входных оптических сигналов, то есть оптическому приемнику свойственна некоторая нелинейность.

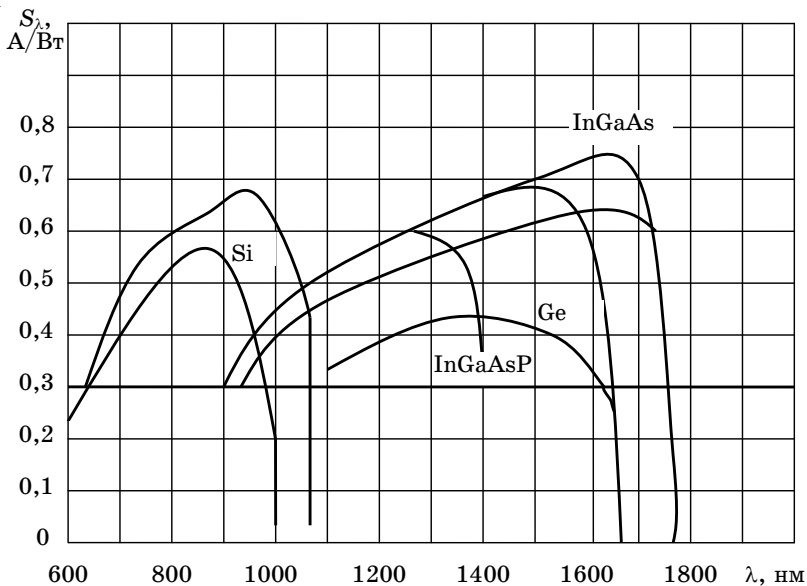


Рис. 1.3. Зависимость относительной спектральной чувствительности *pin*-диодов от длины волны оптического излучения

Отклонение от линейности преобразования в фотоприемнике наступает либо при больших уровнях входного оптического сигнала, что связано с ограничением тока фотодиода сопро-

тивлением нагрузки и внутренним сопротивлением при определенном напряжении питания, либо при очень малых уровнях входного сигнала, когда выходной сигнал становится сравнимым с шумами. Типичная зависимость выходного напряжения фотоприемника $U_{\text{ВЫХ}}$ от входной оптической мощности $P_{\text{ВХ}}$ приведена на рис. 1.4.

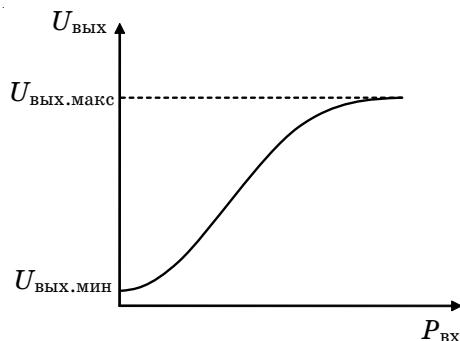


Рис. 1.4. Зависимость выходного напряжения фотоприемника от входной оптической мощности

В ФПУ, включающем в себя фотоприемник и усилитель, верхний предел линейности может определяться как характеристиками фотоприемника, так и характеристиками усилителя. У ФПУ может наблюдаться отклонение от линейности и внутри рабочего диапазона. Нелинейность характеристики преобразования ФПУ внутри рабочего диапазона может привести к искажению сигналов в аналоговых ВОСП. Для цифровых систем это существенного значения не имеет.

Другой не менее важной характеристикой ФПУ является *частотная характеристика*. Частотная характеристика представляет собой зависимость чувствительности ФПУ от частоты гармонической модуляции потока излучения f .

Для большинства практических приложений с достаточной точностью частотная (амплитудно-частотная) характеристика фотодиода может быть описана характеристикой эквивалентного RC -звена:

$$U(f) = \frac{U_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}},$$

где U_0 — напряжение фотосигнала при отсутствии модуляции; $\tau = 1/(2\pi f_0)$ — время фотоотклика, которое часто называют постоянной времени фотоприемника; f_0 — граничная частота (частота отсечки), определяемая из условия $U(f_0) = 0,707U_0$.

Параметром τ иногда пользуются, чтобы описать реакцию фотоприемника на импульсное излучение. Если времена нарастания и спада оптических импульсов настолько малы, что импульсы можно представить как прямоугольные, то под τ понимают время, в течение которого фотосигнал успевает возрасти до 63 %, т.е. в $1 - 1/e$ раз от своего максимального значения.

Можно связать время нарастания τ от уровня 0,1 до уровня 0,9 выходного импульса с частотой отсечки f_0 выражением

$$\tau \cong \frac{0,35}{f_0}, \quad (1.2)$$

где частоту отсечки f_0 часто принимают равной ширине полосы системы.

Типичная зависимость чувствительности фотоприемника от частоты приведена на рис. 1.5.

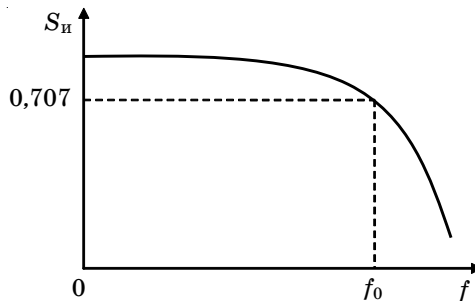


Рис. 1.5. Частотная характеристика фотоприемника

Частотная характеристика фотоприемного устройства определяется в основном частотой отсечки фотодиода f_0 . Она может зависеть и от верхней граничной частоты усиления усилительной схемы, но, как правило, усилитель проектируется исходя из характеристик фотодиода таким образом, чтобы не оказывать влияния на частотную характеристику фотоприемного устройства.

1.8. Системные измерения

В процессе строительства и технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи проводится комплекс измерений для определения состояния кабелей и линейных сооружений, качества функционирования аппаратуры линейного тракта. Эти измерения, связанные с определением способности волоконно-оптической линии связи функционировать в целом как система, можно назвать системными измерениями [1]. В соответствии с действующими в настоящее время стандартами системные измерения для цифровых линий связи должны включать:

- измерение непрерывности оптического волокна;
- измерение энергетического потенциала линии связи, который представляет собой разность между измеренными уровнями средней мощности оптического излучения на выходе передающего устройства и входе приемного устройства, при вносимых потерях обеспечивающую допустимое значение коэффициента ошибок;
- измерение битовой скорости передачи информации;
- измерение коэффициента ошибок BER, который представляет собой число ошибок (обусловленное каналом связи и приемником) на заданное количество переданных битов информации;
- измерение фазового дрожания (джиттера) цифрового сигнала, который представляет собой кратковременное фазовое отклонение цифрового сигнала от его идеального состояния во времени;
- измерение дрейфа фазы (вандера).

1.9. Основные измерения в многоволновых системах передачи

Рассмотренные выше измерения являются наиболее распространенными и применяются при настройке и эксплуатации одноволновых систем передачи. С развитием многоволновых систем, в частности WDM-систем, использующих мультиплексирование по длинам волн, возникает необходимость измерений ряда дополнительных параметров, чтобы

получить точные характеристики компонентов и линий связи в функции от длины волны.

К основным измерениям, которые проводятся в многоволновых системах, относятся следующие [1].

1. *Измерение мощности канала.* Эти измерения необходимы для определения «спектральной однородности» оптической мощности, т.е. равномерности распределения оптической мощности во всей полосе рабочих частот оптического диапазона, которые используются в линии связи.

2. *Измерение центральной длины волны канала и канальных интервалов.* Целью этих измерений является обнаружение нежелательных смещений в спектре лазерных источников излучения.

3. *Измерение отношения сигнал/шум для каждого канала.*

4. *Измерение перекрестных помех.* Эти измерения определяют уровень нежелательного сигнала (шум плюс помехи от других каналов) в полосе пропускания тестируемого канала.

5. *Измерение общей оптической мощности.* Суммирование значений мощности отдельных каналов позволяет оценить нелинейные искажения волокна, которые зависят от общей мощности оптического излучения.

6. *Измерение поляризационной модовой дисперсии.* Измерения должны проводиться при настройке высокоскоростных систем, так как пренебрежение этим фактором может привести к снижению скоростных характеристик системы передачи и необходимости увеличения запаса оптической мощности.

1.10. Измеряемые параметры оптических усилителей

Оптические усилители стали неотъемлемым компонентом волоконно-оптических телекоммуникационных сетей и включаются в протяженные ВОСП, так как позволяют компенсировать возникающие в них системные потери.

Основными измеряемыми параметрами оптических усилителей являются:

1) коэффициент усиления оптического сигнала, который представляет собой отношение выходного и входного оптических сигналов по мощности. Для многоканальных усилите-

лей коэффициент усиления измеряется на длине волны каждого канала;

2) шум оптического усилителя. Для многоканальных усилителей шумы измеряются на длине волны каждого канала;

3) центральная длина волны, полоса пропускания, амплитудно-частотная характеристика, которые определяют частотные свойства и неравномерность усиления в полосе пропускания.

2. Измерение оптической мощности

2.1. Измерение абсолютной оптической мощности

Измерение оптической мощности является метрологической основой волоконной оптики. Почти в каждом средстве измерения параметров световой волны, как правило, в той или иной форме используется измерительный преобразователь оптической мощности. Более того, большинство измерительных задач сводится к определению численных значений мощности оптического излучения. Это измерения средней или максимальной импульсной мощности, распределения энергии импульса излучения во времени (форма импульса) и в пространстве (плотность мощности) и т.п. Различают измерения абсолютной и относительной оптической мощности, из которых первое служит для определения характеристик источников и приемников излучения, например мощности оптического передатчика, чувствительности оптического приемника, а второе — для измерения затухания в оптическом волокне, коэффициента усиления оптического усилителя, потерь, вносимых различными элементами системы передачи.

В общем случае измерение абсолютной оптической мощности представляет собой подключение к измерителю оптической мощности источника излучения с последующим снятием показаний (рис. 2.1). Как правило, данной процедуре предшествует калибровка. При необходимости измерений оптической мощности в ограниченном спектре излучения используются оптические фильтры. Такая схема позволяет определить спектральную мощность излучения в заданном диапазоне длин волн.

Для измерения абсолютной оптической мощности прежде всего необходим правильный выбор приемников излучения, которые должны быть метрологически аттестованы как первичные измерительные преобразователи мощности излучения. Измерительные оптические преобразователи обычно преобра-

зуют оптический сигнал в электрический, мощность которого может быть точно определена по измерениям тока и напряжения. Можно выделить два основных принципа измерения оптической мощности:

1) тепловой принцип, в основе которого лежит двукратное преобразование: сначала световая энергия преобразуется в тепловую, затем тепловая — в электрический сигнал;

2) принцип прямого фотоэлектрического преобразования световой энергии в пропорциональную ей энергию электрического сигнала.

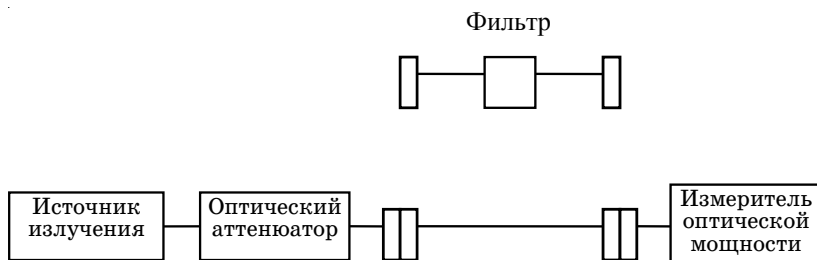


Рис. 2.1. Схема измерения абсолютной оптической мощности

Соответственно этим принципам измерений можно выделить две основные группы измерителей оптической мощности, используемых в ВОСП [1]:

1) измерители на основе термофотодиодов (ТФД), в которых используется тепловой принцип и регистрируется изменение температуры, вызванное оптическим излучением;

2) измерители на основе фотодиодов (ФД), в которых на основе внутреннего фотоэффекта в полупроводниках энергия оптического излучения преобразуется в пропорциональную ей электрическую энергию.

Измерители оптической мощности на фотодиодах обладают достаточно небольшим диапазоном рабочих частот, а также нуждаются в абсолютной калибровке. Тем не менее, они чаще используются вследствие своей высокой чувствительности (регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 1 пВт). Измерители на основе термофотодиодов менее чувствительны (регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 10 мкВт), но обладают высокой стабильностью и их показания независимы от длины волны оптического излучения.

Кроме того, сами термофотодиоды могут быть непосредственно поверены при помощи измерений электрической мощности. Эти измерители предпочтительнее для использования в метрологических лабораториях.

2.2. Измерители мощности с термофотодиодами

В настоящее время наиболее распространенным методом измерения мощности с помощью ТФД является радиометрический метод замещения [1]. Согласно этому методу измеритель мощности (ТФД) сначала подвергается воздействию оптического излучения. Затем оптическое излучение устраняется (с помощью прерывателя, шторки) и заменяется электрически генерируемой мощностью, которая может быть с высокой точностью определена по значениям тока и напряжения.

Чтобы обеспечить точность измерения, необходимо учитывать следующие факторы.

1. Термофотодиод реагирует не только на излучение источника, но и на изменение комнатной температуры. Поэтому необходимы гарантии, что ТФД облучается только оптическим источником. Для устранения влияния засветки используют ряд диафрагм и тепловую изоляцию.

2. Термофотодиод должен обладать высокой поглощающей способностью (желательно 100 %), так как отраженный и рассеянный свет искажают результат измерений. Для увеличения поглощающей способности слой ТФД покрывают черной краской. Измерение отражательной способности ТФД проводится как составная часть начальной калибровки.

3. Тепловое сопротивление между нагревателем и поглощающим слоем должно быть мало, а тепловое сопротивление оболочки велико. В противном случае энергия потерь на тепловое излучение, пропорциональная температуре в четвертой степени, будет велика, что приведет к искажению результата.

Другая реализация данного метода основана на том, что вместо последовательного воздействия оптической и электрической мощности ТФД (тонкопленочный датчик) непрерывно нагревается электрической мощностью, большей оптической, которую надо измерить. Напряжение ТФД вначале, без оптического излучения, фиксируется. Затем при воздействии оптического излучения электрическая мощность уменьшается

до тех пор, пока напряжение ТФД не станет таким же, как и до воздействия света. Результат измерения оптической мощности представляет собой разницу значений электрической мощности между этими двумя процедурами. При этом нет необходимости измерять напряжение ТФД.

Тепловые измерители оптической мощности могут быть использованы в диапазоне длин волн от инфракрасных до ультрафиолетовых при постоянной времени от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от размера термофотодиода. Они регистрируют оптические сигналы мощностью порядка 10 мкВт и выше при погрешности не хуже $\pm 1\%$. Наибольшей проблемой при использовании тепловых измерителей оптической мощности является их низкая чувствительность и большая постоянная времени. Эти характеристики позволяют использовать такие измерители мощности для проверок, калибровки, но в других сферах волоконно-оптических измерений они практически не используются.

Особым типом теплового измерителя мощности является криогенный радиометр, представляющий собой ТФД, помещенный в вакуум и охлажденный жидким гелием приблизительно до 6 К. Криогенные радиометры являются наиболее точными измерителями световой мощности благодаря следующим свойствам:

- 1) при 6 К удельная теплоемкость поглощающего материала значительно снижается. Это уменьшает постоянную времени и, следовательно, время измерения;
- 2) тепловые потери вследствие излучения устраняются, так как энергия тепловых потерь пропорциональна температуре в четвертой степени;
- 3) потери вследствие конвекции устраняются при эксплуатации ТФД в вакууме.

Криогенные радиометры при измерении мощности позволяют достичь погрешности $\pm 0,01\%$. Однако из-за высокой стоимости и сложности в эксплуатации они используются только в национальных калибровочных лабораториях.

2.3. Измерители мощности с фотодиодами

При измерениях малоинтенсивного импульсного излучения базовым методом является метод прямого фотоэлектрического преобразования энергии оптического излучения в пропорциональный ему электрический сигнал. В большинстве измерительных средств, применяемых в волоконной оптике, в качестве первичного преобразователя используются *pin*-фотодиоды или ЛФД. Они обладают высокой чувствительностью, малой инерционностью, способны измерять модулируемую высокочастотную мощность уровнем менее 1 пВт (−90 дБм), сравнительно просты в эксплуатации.

При использовании фотодиода как измерительного преобразователя одним из основных его параметров является чувствительность, которая может быть определена в виде отношения фототока диода I к единице измеряемой оптической мощности P :

$$\gamma = \frac{I}{P}. \quad (2.1)$$

Пусть за время Δt один фотон светового излучения выбивает один электрон в ФД. Тогда фототок диода равен заряду одного электрона e в течение времени Δt :

$$I = \frac{e}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

Оптическая мощность за то же время Δt при частоте световой волны ν равна

$$P = \frac{h\nu}{\Delta t} = \frac{hc}{\lambda\Delta t}, \quad (2.3)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме.

Таким образом, чувствительность с учетом квантовой эффективности η (которая для *pin*-диодов равна 1) будет пропорциональна длине волны λ :

$$\gamma = \frac{e\lambda}{hc} \eta. \quad (2.4)$$

Учитывая, что мощность оптического излучения с напряженностью поля $E(t)$ равна $P \sim |E(t)|^2$, мгновенное значение фототока $I(t)$ *pin*-диода будет определяться выражением

$$I(t) = \gamma P. \quad (2.5)$$

При наличии усиления (в ЛФД) зависимость мгновенного значения фототока $I(t)$ от мощности оптического излучения определяется выражением

$$I(t) = M\gamma P, \quad (2.6)$$

где M — коэффициент усиления.

На практике фотодиоды проявляют отклонение от этой зависимости. Причины отклонения заключаются в целом ряде факторов, существенным образом влияющих на чувствительность фотодиодов и соответственно на точность измерения абсолютной мощности светового излучения. Основными из этих факторов являются следующие [1].

1. Существуют ограничения по длине волны λ . За пределами верхней критической длины волны $\lambda_{кр}$ энергия фотона становится ниже запрещенной энергетической зоны используемого полупроводникового материала и чувствительность резко падает.

2. Вследствие рекомбинации, когда электроны соединяются с дырками до того момента, когда они достигнут электродов, происходит снижение чувствительности γ и, как следствие, фототока. Этот эффект различается для разных фотодиодов.

3. При короткой длине волны некоторые фотоны поглощаются за пределами i -области, вследствие чего уменьшается количество электронно-дырочных пар.

4. Любые отражения от поверхности фотодиода также уменьшают чувствительность. Последний фактор является очень важным. Например, чистый InGaAs имеет показатель преломления 3,5. Френелевское отражение при этом составляет 31 % падающей мощности. Для уменьшения отражения света в фотодиодах применяют антиотражательные покрытия. Однослойные четвертьволновые покрытия снижают уровень отражения до 1 % в пределах ограниченного диапазона длин волн. Для достижения данного уровня отражений в более широком диапазоне длин волн используют многослойные покрытия. Отражательная способность разных фотодиодов существенно отличается, причем небольшие изменения толщины покрытия могут существенно изменить значение коэффициента отражения. Это приводит к погрешностям в измерении абсолютной мощности.

5. Чувствительность γ имеет температурную зависимость. Например, сильная температурная зависимость наблюдается для германия (Ge) при длине волны $\lambda = 1550$ нм. Она может быть описана как смещение верхней критической длины волны приблизительно на 1 нм/К. По этой причине измерители мощности с термостабилизированными диодами имеют лучшую воспроизводимость результатов.

6. Чувствительность γ изменяется в разных точках поверхности полупроводникового диода из-за неоднородности полупроводниковой структуры. В процессе измерения положение и диаметр падающего луча не могут контролироваться, и пространственная неоднородность полупроводниковой структуры приводит к погрешностям измерений.

Одним из ограничений достижения достоверных результатов измерения оптической мощности в широком динамическом диапазоне является нелинейность функции преобразования измерителя. Обычно считается, что фотодиод характеризуется высокой линейностью в диапазоне шести и более декад оптической мощности. Однако существует ряд причин, нарушающих линейность функции преобразования измерителя. Отклонение от линейности преобразования у фотодиодов наступает либо при высоких уровнях оптической мощности (порядка нескольких милливатт), когда увеличение оптической мощности не ведет к увеличению тока фотодиода, либо при очень малых уровнях входного сигнала, когда выходной сигнал становится сравнимым с шумами. При низких уровнях входной мощности (менее 10 мкВт) уровень шума растет с увеличением оптической мощности, нарушая линейность преобразователя.

В течение долгого времени уровни мощности в несколько милливатт хорошо соответствовали уровням мощности коммерческих лазерных диодов (до 5 мВт). В настоящее время мощность полупроводниковых лазеров достигает 100 мВт, оптических усилителей — до 1 Вт. Измерение таких уровней оптической мощности может быть проведено только при ослаблении оптического сигнала.

2.4. Принципы построения измерителей оптической мощности

Как выше подчеркивалось, измерение абсолютного значения оптической мощности является одним из важнейших видов измерений при строительстве, настройке и эксплуатации ВОСП, так как данные измерения позволяют определить соответствие энергетических параметров ВОСП государственным стандартам.

Основными параметрами измерителей абсолютной мощности являются [1]:

- 1) диапазон рабочих длин волн, в котором измеряют среднюю мощность, мкм;
- 2) динамический диапазон измерений средней мощности в указанном диапазоне длин волн или на одной длине волны, Вт;
- 3) пределы относительной погрешности измерения уровня мощности, %.

В настоящее время ГОСТ 51060-97 регламентирует основные технические характеристики (табл. 2.1), которые должны обеспечивать измерители мощности.

Эти параметры должны обеспечиваться в нормальных климатических условиях по установлению рабочего режима прибора (время установления должно быть от 4 с до 30 мин). Согласно ГОСТ 28871-90 измерения должны проводиться на длинах волн $\lambda = (850 \pm 10)$, (1300 ± 20) , $1550 (+20 \div -30)$ мкм в диапазоне средней мощности от -70 до $+10$ дБм и погрешностью 1,23 и 0,78 дБ при -60 и -40 дБм соответственно.

Таблица 2.1

Характеристики измерителей мощности

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих длин волн, мкм	0,6–1,7
Диапазон измерений средней мощности, Вт	10^{-12} – 10^{-2}
Пределы основной допускаемой погрешности, %:	
диапазон 10^{-10} – 10^{-2} Вт	6–8
диапазон 10^{-12} – 10^{-3} Вт	8–10

В схемотехническом плане измерители оптической мощности могут быть выполнены на основе логарифмического усилителя, линейного усилителя с дискретно управляемым коэффициентом усиления и преобразователя тока ФД в частоту импульсов. В самом простом измерителе фотодиод через логарифмический усилитель подключен к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), соединенному с жидкокристаллическим индикатором. Параметры логарифмического усилителя зависят от напряжения питания, температуры, и поэтому точность и динамический диапазон приборов данного типа относительно невысоки. К ним относятся FOT-02 (EXFO), OLP-5 (W and G), 555 (Refocs), M 712 (Fotes).

Измерители мощности с линейным усилителем имеют более высокие технические характеристики. В них измеряемый сигнал после усиления поступает на индикатор через АЦП и микроконтроллер. Микроконтроллер управляет коэффициентом усиления и позволяет осуществлять высокоточное преобразование результатов измерения в логарифмический масштаб. К таким приборам относятся Алмаз 2 (Лионир), AQ2150 (Ando), FOT-903 (EXPO), K2401 (Siemens), LP-6000 (GN Nettest), OLP-18 (W and G).

В измерителях с аналого-частотным преобразованием (типа AM-3500 (GN Nettest)) также используется микроконтроллер для управления процессом преобразования измеряемого сигнала в частоту импульсов. Метрологические характеристики измерителей мощности приборов данного типа не хуже, чем у приборов с линейным усилителем. Однако наличие погрешностей, вызванных зависимостью показаний от напряжения питания, низкая устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям являются их основными недостатками. Для полевых измерений средней мощности оптического излучения наиболее эффективны измерители с линейным усилителем и дискретно изменяемым коэффициентом усиления. Приборы, в которых особое внимание уделено качеству оптического разъема, термостабилизации и уменьшению шумов компонентов, имеют относительную погрешность не более 5%. Такие приборы (например, FLS-220/EXPO) обеспечивают диапазон измерений от +3 до -70 дБм, однако у них большие габариты и они используются в основном в составе поверочных установок.

2.5. Измерение затухания

Затуханием оптического волокна называется ослабление интенсивности света по мере распространения его в световоде. Затухание является наиболее важным параметром оптических волокон. Полное затухание оптического сигнала в световодах определяется коэффициентом затухания α , который в общем виде равен

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}}, \quad (2.7)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — составляющая коэффициента затухания, которая характеризует ослабление излучения за счет собственного поглощения материала сердцевины. Эта составляющая в значительной степени зависит от спектрального состава передаваемого излучения; $\alpha_{\text{р}}$ — составляющая коэффициента затухания, характеризующая ослабление излучения за счет рассеивания световой энергии. Составляющая $\alpha_{\text{р}}$ определяется в основном рэлеевским рассеянием, обусловленным малыми по сравнению с длиной волны флуктуациями (в том числе и тепловыми) показателя преломления оптического волокна; $\alpha_{\text{пр}}$ — составляющая коэффициента затухания, связанная с наличием в оптическом волокне посторонних примесей, приводящих к дополнительному поглощению оптической мощности. Такими примесями являются ионы металлов (Fe^{+2} , Cu^{+2} , Cr^{+3}) и гидроксидные группы (ОН), вызывающие резонансный всплеск затухания на определенных длинах волн; $\alpha_{\text{к}}$ — составляющая коэффициента затухания, характеризующая дополнительные потери оптической мощности за счет скрутки, деформации и изгибов оптического волокна при изготовлении оптического кабеля (эти потери называют кабельными).

Измеряют, как правило, коэффициент полного затухания оптического световода по мощности α . Обычно α выражается в децибелах и определяется по формуле

$$\alpha = 10 \lg \left\{ \left[P_0 I_S / (1 - \rho^2) \right] / P_L \right\}, \quad (2.8)$$

где P_0 — оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на входе волокна; P_L — оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на выходе волокна; ρ — коэффициент отражения от входного торца волокна; I_S — эффективность ввода излучения в оптический световод.

При согласованном вводе и выводе излучения, к чему обычно стремятся на практике, приходим к традиционной формуле

$$\alpha = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_L} \right). \quad (2.9)$$

Измерение затухания оптического световода — сложная научно-техническая задача. Однозначно определить коэффициент α трудно. На воспроизводимость результатов влияют микро- и макроизгибы, изменения температуры и давления, способ возбуждения оптического волокна. В многомодовых волокнах измерение осложняется распространением большого количества мод в волокне, каждая из которых имеет собственные характеристики распространения. В связи с этим необходимыми условиями измерения затухания являются:

1) постоянство мощности оптического излучателя, его центральной длины волны λ и ширины спектра излучения $\Delta\lambda$, причем $\Delta\lambda$ не должна превышать характеристику спектрального затухания волокна;

2) неизменность модового состава оптического излучения, что позволяет избежать потерь мощности в многомодовых волокнах за счет быстро затухающих мод высшего порядка;

3) вывод мод оболочки, что позволяет избежать их влияния на мощность оптического сигнала на выходе волокна.

Первое условие — постоянство характеристик источника излучения — обеспечивается выбором излучателя.

Второе условие — неизменность модового состава оптического излучения — выполняется в многомодовых волокнах только при достижении равновесного распределения мод. Эффективная длина установления равновесного распределения мод в волокне может составлять от сотен метров до нескольких километров и зависит от типа волокна, способа возбуждения, микро- и макроизгибов. Для формирования распределения мод, близкого к равновесному в коротких отрезках волокна, широкое применение находят смесители и фильтры мод. Известно несколько конструкций фильтров мод: спиральный фильтр мод, который образуется несколькими витками световода (3–5 витков), намотанных на стержень диаметром 15–40 мм; система штырей — гребенка, через которую оптическое волокно пропускается с небольшим радиусом изгиба. Хорошей эффективностью обладает биконический фильтр, образованный двойным конусным переходом световода через

меньший размер на прежние параметры. Такой фильтр можно создать перетяжкой разогретого волокна на диаметр 0,6 от номинального на длине 1–2 мм.

Общим для всех смесителей и фильтров мод является обеспечение условий для сильной связи мод различных порядков на вызываемых внешними причинами макроизгибах и микро неоднородностях волокна, достижение равной мощности излучения во всех модах и неизменность модового состава.

Третье условие — вывод мод оболочки — обеспечивается обычно иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой равен или больше показателя преломления оболочки.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить коэффициент затухания — затухание на единицу длины волокна (дБ/км):

$$\beta(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{L}, \quad (2.10)$$

которое не зависит от выбранной длины волокна.

К настоящему времени согласно рекомендациям ГОСТ 26814-86 на практике применяются следующие методы измерения затухания: метод обламывания; безобломный метод (другое его название — метод вносимых потерь). Методы относятся к группе «точка — точка» [5], при которых измеритель и источник размещаются по разные стороны тестируемого объекта. Схема измерения затухания методом обламывания приведена на рис. 2.2.

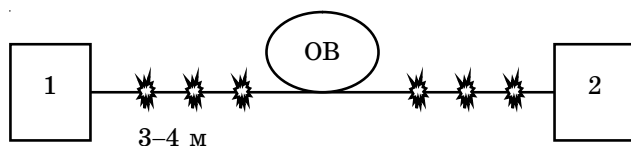


Рис. 2.2. Измерение затухания методом обламывания:
1 — источник излучения; 2 — приемник излучения

Измерение выполняется следующим образом. Сначала фиксируются показания измерителя мощности при подключении к источнику излучения тестируемого волокна. Затем при выключенном источнике производится обламывание волокна на расстоянии порядка 3–4 м от источника и фиксируется торец отрезка на входе измерителя мощности. При включении излучателя вновь фиксируются показания измерителя.

Потери (дБм) определяются как разность между эталонным уровнем $\alpha_{\text{эт}}$ (на коротком отрезке) и уровнем измерения на всей длине волокне $\alpha_{\text{изм}}$:

$$\alpha = \alpha_{\text{эт}} - \alpha_{\text{изм}}. \quad (2.11)$$

Для повышения точности при малом значении потерь измерение производят несколько раз, обламывая оптическое волокно в нескольких точках.

Если необходимо измерить значение удельного затухания β , то полученное затухание α делится на длину волокна.

Метод обламывания является наиболее точным методом измерения затухания, сравнительно прост, но из-за необходимости разрыва волокна его использование при настройке и техническом обслуживании ВОСП в полевых условиях неэффективно. Поэтому он применяется только при производстве оптических волокон.

Схема измерения затухания методом вносимых потерь приведена на рис. 2.3. Согласно этому методу измерения осуществляются в два этапа. На первом этапе (этап калибровки) производится измерение оптической мощности на выходе вспомогательного волокна (рис. 2.3,а). Это может быть волокно того же типа, что и измеряемое, но длиной не более 2 м, чтобы можно было пренебречь его затуханием. На втором этапе, схема которого изображена на рис. 2.3,б, подсоединяется измеряемое волокно, и соединение регулируется по максимальному уровню мощности. Потери оптического излучения в волокне определяются как разность между эталонным уровнем оптической мощности и уровнем второго измерения. Для увеличения точности измерения рекомендуется производить его в двух направлениях с усреднением полученного результата.

Метод вносимых потерь требует качественного соединения волокон и менее точен, чем предыдущий, из-за погрешности, обусловленной непостоянством потерь в коннекторе при соединении кабелей. Однако этот метод не требует разрыва волокна и обычно используется в полевых условиях.

Отметим, что затухание оптического волокна, как и потери, вносимые в линию связи отдельными компонентами линии, есть всегда частное от деления двух уровней мощности. Поэтому при измерениях затухания или вносимых потерь точность измерения абсолютной мощности не важна. Важна погрешность определения отношения мощностей и, следовательно,

но, в первую очередь необходима линейность характеристики фотоприемника.

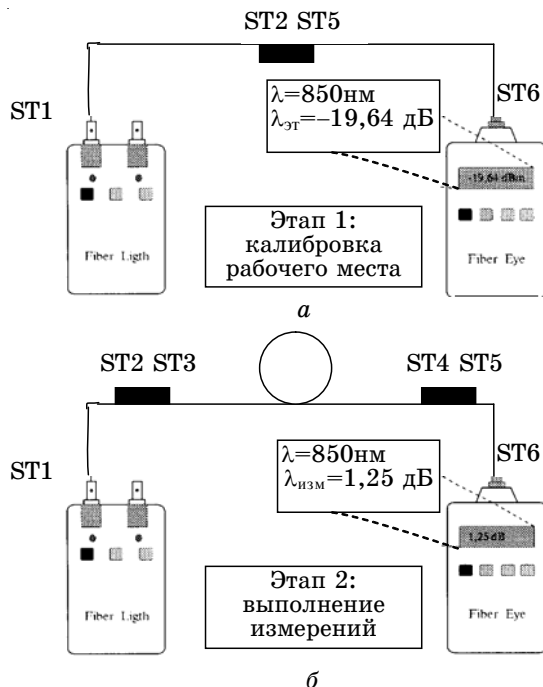


Рис. 2.3. Измерение затухания методом вносимых потерь:
а — калибровка; б — измерение

Для определения затухания сигнала в кабельной системе линии и отдельных ее компонентах используются измерители оптических потерь (оптические тестеры). Оптическими тестерами называют приборы, в которых используются согласованные пары источника излучения — приемник (измеритель оптической мощности). Перечисленные в подразд. 2.4 приборы для измерения абсолютной мощности могут быть использованы и для измерения затухания. Основные технические характеристики некоторых оптических тестеров приведены в табл. 2.2.

Для расширения функциональных возможностей измерители оптической мощности обычно дополняются источником излучения, что и позволяет использовать их для измерения потерь в волокне или вносимых потерь.

Таблица 2.2

Характеристики оптических тестеров

Параметр	FTB- 250-202 (Exfo)	FTB-250-303 (Exfo)	FTB-250-303 (Exfo)	OFT-50 (Exfo)	OFT-30 (Wandel & Goltermann)	AQ7225A (Wandel & Golter- mann)	AQ7229A (Ando)
Тип световода	SM	SM	MM	SM	MM	SM	MM
Длина волны, нм	1310	1550	850	1310	850	1310	850
Динамический диапазон, дБ	28	26	24	30	22	31	31
Ближняя зона нечувстви- тельности, м	3	5	2	—	—	25	25
Разрешающая способность, м	15	25	7	14	8	5	5
Масса, кг	6,52				2,5	—	4,6

3. Измерение числовой апертуры

Числовая апертура является одной из важнейших оптико-геометрических характеристик волоконного световода и важным измеряемым параметром, так как световод должен обеспечивать распространение потоков излучения, входящих под максимально большим углом к его продольной оси [1, 4, 6]. На рис. 3.1 показаны продольное осевое сечение ступенчатого волокна и процесс распространения световых лучей в рамках геометрической оптики.

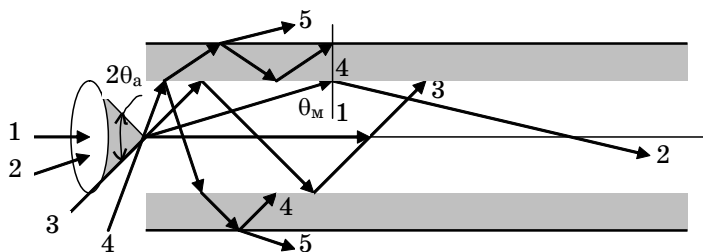


Рис. 3.1 Распространение световых лучей в волоконном световоде

При попадании светового луча на торец оптического волокна (ОВ) в нем могут появиться три типа световых лучей: направляемые (лучи 1, 2, 3), вытекающие — лучи оболочки (луч 4), и излучаемые, которые излучаются из оболочки в окружающее пространство (луч 5). Очевидно, что излучаемые и вытекающие волны — это паразитные волны, приводящие к рассеиванию энергии и искажению информационного сигнала.

Направляемые лучи в зависимости от траектории следует разделить на меридианные и косые световые лучи. Траектория меридианных лучей лежит в плоскости, проходящей через ось волокна, и имеет зигзагообразный вид (лучи 2, 3). Косые лучи распространяются по спиралеобразной траектории, проекция которой на поперечное сечение волокна имеет вид правильного незамкнутого треугольника.

Меридианные световые лучи характеризуются углом падения на оболочку θ_m , образованным лучом и нормалью к оси волокна. Критический режим соответствует условию

$$\sin \theta_{кр} = n_u/n_c, \quad (3.1)$$

где $\theta_{кр}$ — угол полного внутреннего отражения; n_c , n_u — показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно.

При выполнении условия $\theta_m < \theta_{кр}$ луч распространяется вдоль сердцевины волокна и может обеспечить передачу сигнала на большие расстояния.

Угол θ_a между оптической осью и одной из образующих светового конуса — лучей, падающих на торец оптического волокна, для которых в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения, носит название апертуры ОВ. Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в волокно, а для ее числовой оценки используется понятие номинальной числовой апертуры (Numerical Aperture), значение которой для ступенчатого оптического волокна определяется выражением

$$NA = n_0 \sin \theta_a, \quad (3.2)$$

где n_0 — показатель преломления окружающей среды, для воздуха $n_0 = 1$.

В соответствии с законом Снеллиуса для лучей на входном торце оптического волокна можно записать

$$n_0 \sin \theta_a = n_c \sin (\pi/2 - \theta_{кр}),$$

и, учитывая, что

$$\theta_{кр} = \arcsin (n_u/n_c),$$

выражение для номинальной числовой апертуры примет вид

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} \approx n_c \sqrt{\Delta}, \quad (3.3)$$

где $\Delta = (n_c^2 - n_u^2)/2n_c^2 \approx (n_c - n_u)/n_c$ называется относительной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки оптического волокна.

Из последнего выражения видно, что с увеличением разности показателей преломления сердцевины и оболочки значение NA возрастает и, следовательно, улучшается эффективность ввода излучения в оптическое волокно.

Полученное выражение учитывает только меридианные лучи, в то время как в оптическом волокне в основном имеют место косые лучи с гораздо более сложной траекторией распространения. Получить простое выражение для числовой апертуры косых лучей не удастся. Однако отметим, что апертура, вычисленная по выражению (3.3) для меридианных лучей ступенчатого волокна, меньше действительной апертуры, учитывающей все введенные лучи.

В градиентных оптических волокнах числовая апертура непостоянна по сечению сердцевины волокна. Для градиентных волокон вводится понятие локальной числовой апертуры

$$NA(r) = \sqrt{n_c^2(r) - n_u^2}. \quad (3.4)$$

Излучение, падающее на торец градиентного волокна в точке r , будет распространяться, только если в этой точке оно окажется в пределах локальной числовой апертуры $NA(r)$. Очевидно, что при $r = 0$, т.е. при вводе излучения вдоль оси волокна, локальная числовая апертура равна номинальной. При удалении от оси в градиентном волокне уменьшается и локальная числовая апертура $NA(r)$.

Таким образом, эффективная числовая апертура градиентного волокна оказывается меньшей, чем у ступенчатого. Для наиболее распространенного градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления числовая апертура определяется выражением

$$NA = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n_c^2 - n_u^2}. \quad (3.5)$$

Апертура представляет интерес и может явиться предметом измерений в основном применительно к многомодовым волокнам, поскольку равенство числовых апертур источника излучения, оптического волокна и приемника излучения является одним из необходимых условий достижения малых потерь при их соединениях.

Для измерения числовой апертуры волокна обычно определяют апертурный угол θ_a . Апертурный угол можно определить на основании измерений угловой характеристики излучения волокна. Для этого в отрезок волокна длиной не менее нескольких метров вводится через смеситель мод и фильтр оболочечных мод излучение от лазера. На выходе волокна на расстоянии 10–20 см от торца под различными углами к оси

волокна сканирующим фотоприемником измеряется относительная яркость излучения $r(\theta)$:

$$r(\theta) = L_\theta / L_0, \quad (3.6)$$

где L_θ — яркость в направлениях, образующих угол θ с осью волокна; L_0 — яркость в направлении $\theta = 0$. Апертурный угол θ_a соответствует $r(\theta_a) = \sigma$, где $\sigma < 1$. Практически σ выбирается достаточно малой (0,05 или 0,1), так, чтобы в световом конусе, ограниченном апертурным углом, содержалось 90 % излучаемой энергии.

При измерениях выходной торец волокна должен быть хорошо обработан, плоскость его должна быть перпендикулярна оси волокна, которая должна совпадать с осью фотоприемника при его угловом центральном положении.

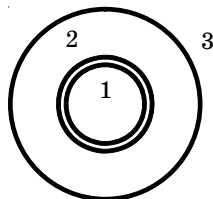


Рис. 3.2. Метод трех колец

Другим методом измерения апертурного угла является метод трех колец. Метод основан на том, что на выходном торце волокна (рис. 3.2): 1) ярче светится сердцевина 1, если на входной торце световой пучок падает под углом, меньшим апертурного; 2) ярче светится оболочка 2, если на входной торце световой пучок падает под углом, большим апертурного; 3) граница раздела сердцевины 1 и оболочки 3 представляет ярко светящееся кольцо, если пучок падает под углом, равным апертурному.

Структурная схема установки для измерения апертуры методом трех колец представлена на рис. 3.3.

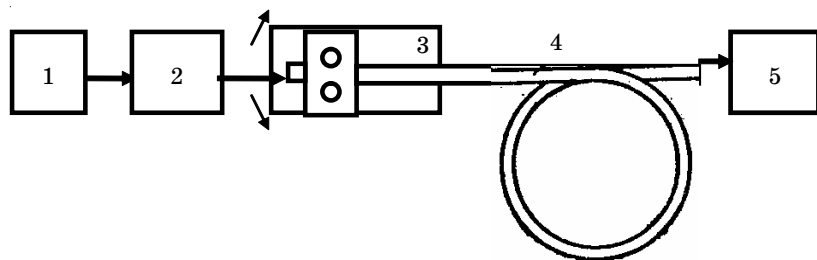


Рис 3.3. Схема установки для измерения апертуры методом трех колец

Коллимированный пучок лазера 1 фокусируется системой 2 на входной торец исследуемого волокна 4, закрепленного на поворотном столике 3. Стол вращается вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии волокна. Выходной торец волокна рассматривается через микроскоп 5. Четкое кольцо на границе сердцевины и оболочки наблюдается при определенном угле падения, который фиксируют.

Вращая стол в ту сторону, при которой ярко светится сердцевина, до момента появления такого же кольца, снова фиксируют угол. Полусумма этих двух углов определяет апертурный угол. Метод применим в основном для многомодовых волокон с диаметром больше 1 мм. Это связано с трудностями ввода оптического излучения под меняющимся углом в волокно меньшего диаметра.

4. Измерение диаметра модового поля

Одной из основных характеристик одномодового волокна является распределение интенсивности светового поля в поперечном сечении на выходе волокна, определяемое еще как модовое пятно [1].

Распределение поля основной моды как для градиентных, так и для ступенчатых волокон вблизи длины волны отсечки с хорошей точностью можно аппроксимировать функцией Гаусса. При выполнении этого условия диаметр модового пятна можно определить как расстояние между двумя точками, в которых измеренная интенсивность света составляет уровень в e^2 раз меньший уровня максимальной интенсивности. Распределение интенсивности светового излучения на выходе из волокна показано на рис. 4.1.

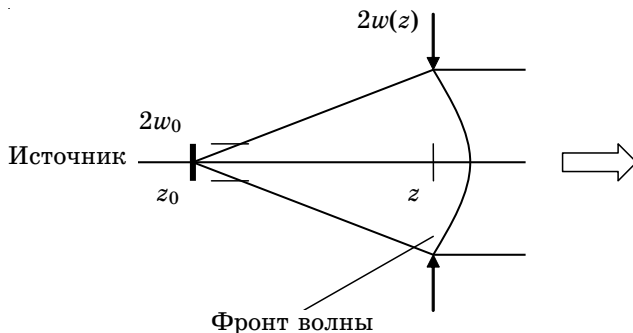


Рис. 4.1. К определению распределения интенсивности светового излучения на выходе из волокна

На рис. 4.1 через z обозначено расстояние, измеряемое в направлении распространения, $w(z)$ — радиус луча, w_0 — радиус излучающей области на выходе волокна.

При этом на любом расстоянии z радиус луча $w(z)$ определяется выражением [1]

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\lambda z / \pi w_0^2 \right)^2 \right]. \quad (4.1)$$

Особенностью гауссова светового пучка является то, что он полностью определяется только двумя показателями: радиусом светового пучка w_0 и длиной световой волны λ . Поэтому характеристики излучения, в частности распределение интенсивности светового поля на выходе волокна, могут быть определены исходя из измерений размеров светового пятна в дальней зоне. Анализ интенсивности излучения на некотором расстоянии от торца волокна позволяет осуществить подсчет эффективности соединения одномодового волокна с другими оптическими компонентами линии связи.

Другой метод измерения диаметра модового поля — метод ближнего поля — обеспечивает прямое измерение диаметра модового поля. Метод основан на измерении диаметра модового пятна на выходном торце одномодового волокна с помощью хорошо сфокусированной оптики, осуществляющей передачу распределения мощности излучения по торцу волокна на площадку фотодиода. Результаты измерений с малыми погрешностями получаются только при использовании высококачественной оптической системы, при наличии хорошо обработанных и плоских торцов у исследуемого волокна и применении детекторов с большим динамическим диапазоном. Данный метод позволяет определять и геометрические параметры волокна, в частности диаметр и неконцентричность сердцевины.

Третий метод измерения диаметра модового поля — метод поперечного смещения — основан на измерении мощности излучения, выходящего из двух последовательно соединенных одномодовых волокон при их взаимном радиальном смещении в месте соединения. Размер модового пятна определяется по уровню $1/e^2$ функции передачи мощности излучения в зависимости от смещения. Максимальное значение проходящая световая мощность имеет при соосном расположении волокон.

Отличительной особенностью данного метода является его простота при точности измерения, не уступающей другим методам. В отличие от предыдущего, данный метод не позволяет определять геометрические параметры волокна.

5. Измерение длины волны отсечки одномодовых волокон

В оптическом волноводе могут распространяться два типа волн: симметричные E_{nm} и H_{nm} , у которых наряду с двумя поперечными имеется по одной продольной составляющей, и несимметричные волны, имеющие одновременно по две продольные составляющие, одна из которых EH_{nm} с преобладанием электрической составляющей, другая HE_{nm} с преобладанием магнитной составляющей. Индекс n здесь означает число перемен знака в поперечном распределении поля вдоль угловой координаты, индекс m — вдоль радиуса. Следует отметить, связывая электромагнитную теорию с лучевой теорией, что симметричные волны соответствуют меридианным лучам, а несимметричные — косым лучам.

Область существования каждой моды зависит от нормированной частоты оптического световода v :

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = \frac{2\pi R}{\lambda} NA, \quad (5.1)$$

где R — радиус сердцевинки; NA — числовая апертура; λ — длина распространяющейся световой волны.

Так как для оптических волокон радиус R сердцевинки, показатели преломления сердцевинки n_c и оболочки n_u имеют постоянные значения, область изменений нормированной частоты определяется изменением длины волны λ .

Среди направляемых мод особое положение занимает мода HE_{11} , у которой критическое значение нормированной частоты $v_{11} = 0$. Это основная (фундаментальная) мода ступенчатого оптического волокна, так как она распространяется при любой частоте света и любых структурных параметрах волокна. С точки зрения геометрической оптики мода HE_{11} образуется лучом, вводимым вдоль оси волокна, так как только характеристики такого луча не зависят от условий отражения на границе «сердцевина — оболочка». Именно при работе на

этой моде волокно называют одномодовым. Выбирая параметры оптического волокна, можно получить режим распространения одной только моды HE_{11} , что реализуется при условии

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} < 2,405. \quad (5.2)$$

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется только одна фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки. Значение длины волны отсечки определяется из выражения

$$\lambda_0 = 2\pi R \sqrt{n_c^2 - n_u^2} / 2,405. \quad (5.3)$$

Длина волны отсечки одномодового волокна определяет самую короткую длину световой волны, которую следует использовать. При более короткой длине световой волны ($\lambda < \lambda_0$) в волокне будут распространяться и другие моды, которые принято называть высшими.

Измерение длины волны отсечки осуществляется двумя методами: методом передаваемой мощности и методом контроля диаметра модового пятна.

Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности основано на измерении мощности светового излучения на выходе волокна в зависимости от длины волны. В качестве модулированного источника излучения используется перестраиваемый по длине волны лазер с шириной спектра, не превышающей 10 нм.

Метод заключается в сравнении сигнала, передаваемого по волокну небольшой длины, с образцовым сигналом, который получают на выходе либо испытываемого волокна, согнутого в кольцо диаметром менее 10 см (метод изгиба), либо многомодового волокна длиной от 1 до 2 м.

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе проводят измерение оптической мощности $P_1(\lambda)$ в испытываемом волокне небольшой длины (прямом либо слабо изогнутым). На втором этапе измеряют мощность $P_2(\lambda)$ на выходе испытываемого волокна, изогнутого меньшим радиусом, обычно составляющим 3 см, или мощность $P_3(\lambda)$ на выходе 1–2 м многомодового волокна. Выходную мощность регистрируют на каждой длине волны диапазона измерений, предположительно включающего длину волны отсечки. Отношение

передаваемой мощности $P_1(\lambda)$ к $P_2(\lambda)$ или $P_1(\lambda)$ к $P_3(\lambda)$ рассчитывают согласно выражению

$$\xi = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5.4)$$

где $i = 2$ или 3 в зависимости от метода.

В случае одномодового волокна длину волны отсечки λ_0 определяют по максимальной длине волны, при которой $\xi(\lambda) = 0,1$ дБ (рис. 5.1).

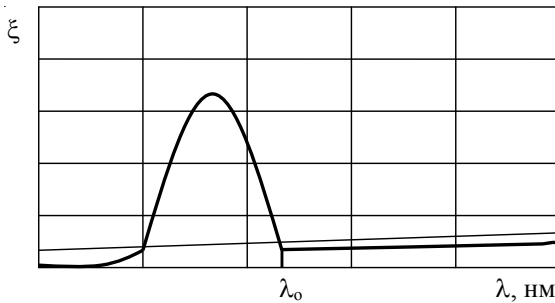


Рис. 5.1. График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием одномодового волокна

В случае многомодового волокна длину волны отсечки λ_0 определяют при пересечении прямой 1, проведенной на $0,1$ дБ выше линейного участка 2 кривой $\xi(\lambda)$ (рис. 5.2).

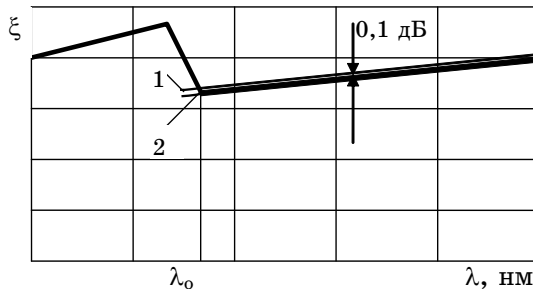


Рис. 5.2. График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием многомодового волокна

При переходе через длину волны, равную длине волны отсечки λ_0 , в обоих случаях происходит изменение пропускания волокна. В первом методе — сильно изогнутого одномодового

волокна за счет рассеяния на изгибах по сравнению с прямым или слабо изогнутым волокном, во втором методе — прямого одномодового волокна по сравнению с многомодовым, спектральная зависимость затухания которого не имеет резких изменений.

Применение для измерений коротких образцов связано с необходимостью уменьшения до минимально возможного влияния микроизгибов, под действием которых длина волны отсечки перемещается в коротковолновую область.

Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля основано на зависимости диаметра модового пятна w от длины волны передаваемой по волокну световой мощности (рис. 5.3).

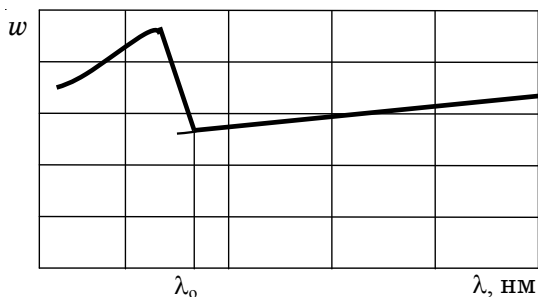


Рис. 5.3. График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием модового пятна

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе измеряется диаметр модового пятна на выходном торце волокна в зависимости от длины волны. Измерения проводятся одним из методов, приведенных в разделе 4. На втором этапе строится график, отражающий зависимость диаметра модового пятна от длины волны (см. рис. 5.3), и определяется длина волны отсечки.

6. Измерение спектральных характеристик

6.1. Анализ оптического спектра

Анализ оптического спектра представляет собой измерение оптической мощности в зависимости от длины волны. В связи с развивающимися технологиями WDM-уплотнения анализ оптического спектра становится одним из важнейших видов измерений в высокоскоростных ВОСП. Необходимость анализа оптического спектра вызвана также возникающей в волокне и определяемой шириной спектра источника излучения хроматической дисперсией, которая ограничивает ширину полосы пропускания высокоскоростных линий связи. В общем виде анализ оптического спектра проводится по схеме, приведенной на рис. 6.1.

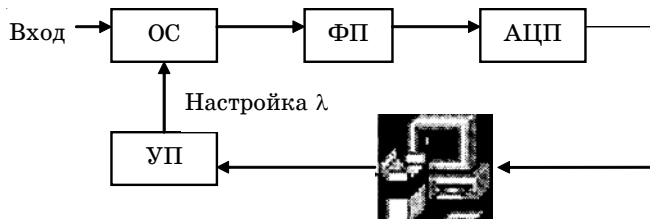


Рис. 6.1. Обобщенная схема анализатора оптического спектра

Входной сигнал поступает через оптическую систему (ОС) на фотоприемник (ФП), а затем, после аналого-цифрового преобразования (АЦП), на компьютер. Компьютер осуществляет обработку данных, их отображение и управление оптической системой (УОП). Алгоритмы управления и обработки данных определяются оптической системой анализатора.

Для узкополосного с высоким разрешением спектрального анализа используются методы оптической фильтрации. В этом случае оптическая система анализатора спектра представляет собой перестраиваемый по длине волны оптический фильтр. Оптический фильтр проводит пространственное разделение

входного излучения на спектральные составляющие, которые фотоприемником преобразуются в электрический ток, пропорциональный мощности соответствующей спектральной составляющей. В качестве оптического фильтра могут быть использованы интерферометр Фабри — Перо или дифракционные решетки.

6.2. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри — Перо

Классический интерферометр Фабри — Перо (FPI), выполняющий функции оптического фильтра, состоит из двух параллельных зеркал с высоким коэффициентом отражения (рис. 6.2). Зеркала образуют оптический резонатор, фильтрующий входное оптическое излучение.

Исследуем интерференцию многих световых пучков, возникающую при прохождении плоской монохроматической волны через две параллельные пластины.

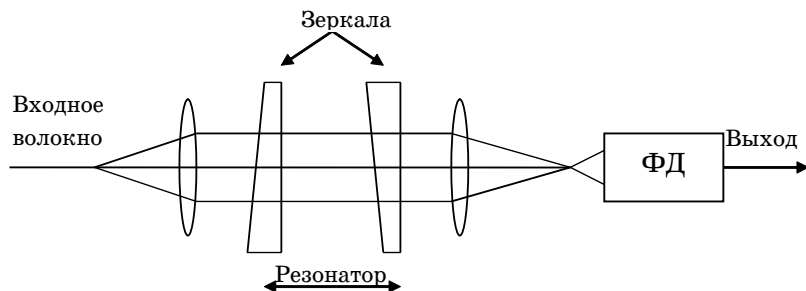


Рис. 6.2. Оптическая система анализатора оптического спектра на основе интерферометра Фабри — Перо

Пусть на первое зеркало интерферометра падает волна амплитуды E_0 под углом φ (рис. 6.3). Волна проходит в полость резонатора с коэффициентом пропускания t_0 и, частично отражаясь на втором зеркале с коэффициентом отражения пластины r_0 , волна выходит из резонатора с амплитудой E_1 :

$$\dot{E}_1 = t_0 t_1 \dot{E}_0 e^{-ikh} = t \dot{E}_0 e^{-ikh}, \quad (6.1)$$

где t_1 — коэффициент пропускания второго зеркала; $t = t_0 t_1$ — коэффициент пропускания обоих зеркал; $kh = 2\pi nd/\lambda \cos \varphi$ —

набег фазы; d — длина резонатора; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $n = 1$ — показатель преломления воздушного промежутка между зеркалами; λ — длина волны в вакууме; φ — угол падения луча.

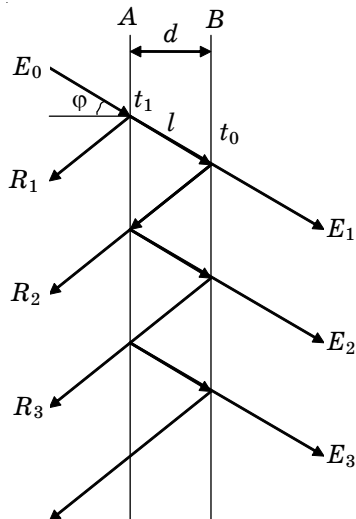


Рис. 6.3. Ход лучей в интерферометре Фабри — Перо

При дальнейшем распространении электромагнитное поле, отраженное от второго зеркала, претерпевает еще два отражения, и на выходе второй луч с амплитудой E_2 можем записать следующим образом:

$$\dot{E}_1 = tr_0^2 \dot{E}_0 e^{-i3kl} = tr \dot{E}_0 e^{-i3kl}, \quad (6.2)$$

где $r = r_0^2$.

При достаточно большом коэффициенте отражения зеркал r_0 на выходе имеем интерференцию многих лучей. Разность хода между любыми соседними лучами есть $\Delta = 2dn \cos \varphi$, а разность фаз между этими же лучами определяется выражением

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} dn \cos \varphi. \quad (6.3)$$

Примем начальную фазу на выходе из интерферометра для первого прямопроходящего луча за ноль. Тогда результирующую

щее поле, представляющее сумму всех частичных полей, может быть записано в виде

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = tE_0 \left[1 + re^{-i\delta} + r^2 e^{-i2\delta} + \dots + r^N e^{-iN\delta} \right]. \quad (6.4)$$

Ряд (6.4) убывающий (поскольку $r < 1$) и может быть представлен в виде

$$E = \frac{tE_0}{1 - re^{-i\delta}}. \quad (6.5)$$

Сигнал на выходе фотоприемника пропорционален не значению электрического поля, а значению интенсивности световой волны, которое можно определить как

$$I = \frac{1}{2} E \cdot E^*,$$

где E^* — комплексно-сопряженная величина.

В результате интенсивность проходящей световой волны будет равна

$$I_{\text{пр}} = I_0 \frac{t^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)} = \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)}, \quad (6.6)$$

где $I_0 = E_0^2$ — интенсивность падающей волны; r — коэффициент отражения зеркал.

Из полученного соотношения (6.6) следует, что интерферирующие лучи усилят друг друга и интенсивность прошедшего луча будет максимальна всякий раз, когда $\sin^2(\delta/2) = 0$, т.е. когда $\delta/2 = m\pi$, где $m > 0$ — любое целое число. Очевидно, что резонансные частоты интерферометра f_m будут определяться выражением:

$$f_m = \frac{mc}{2dn \cos \varphi}, \quad (6.7)$$

где c — скорость света в вакууме.

Однако больший интерес, чем резонансные частоты, представляют интервалы между ними. Ширина свободной зоны между максимумами по частоте $S(f)$, определенная из соотношения (6.7), будет [1]

$$S(f) = \frac{c}{2nd \cos \varphi}. \quad (6.8)$$

А в терминах длины волны расстояние между максимумами определится выражением

$$S(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2nd \cos \varphi}. \quad (6.9)$$

Как видно из приведенных выражений, резонансные частоты интерферометра и ширина свободной зоны между максимумами зависят от расстояния между зеркалами d и наклона самого интерферометра (угол φ) относительно входного луча.

Охарактеризуем форму контура интерференционной полосы. Обозначим через ε ширину интерференционной полосы — расстояние между двумя точками, для которых $I_{\text{пр}}/I_0 = 1/2$. Это соотношение интенсивностей прошедшего и падающего излучения получается при фазовом сдвиге

$$\frac{\delta}{2} = m\pi \pm \frac{\varepsilon}{2}. \quad (6.10)$$

Тогда, поскольку $\varepsilon/2$ мало и можно заменить значение $\sin(\varepsilon/2)$ его аргументом, получим из формулы (6.6):

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{пр}}}{I_0} &= \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\varepsilon/2)} \approx \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r(\varepsilon/2)^2} = \\ &= \frac{1}{1 + 4(\varepsilon/2)^2 \frac{r}{(1-r)^2}} = \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Из соотношения (6.11) следует, что ширина интерференционной полосы определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{1-r}{\sqrt{r}}. \quad (6.12)$$

Из соотношения (6.12) следует, что характер распределения относительного пропускания существенно зависит от коэффициента отражения зеркал, причем чем выше коэффициент отражения r , тем острее максимумы, разделенные широкими минимумами (рис. 6.4).

Связь между шириной интерференционной полосы ε и шириной интервала между максимумами (которому соответствует изменение δ на 2π) характеризуется критерием резкости F :

$$F = \frac{2\pi}{\varepsilon} = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r}. \quad (6.13)$$

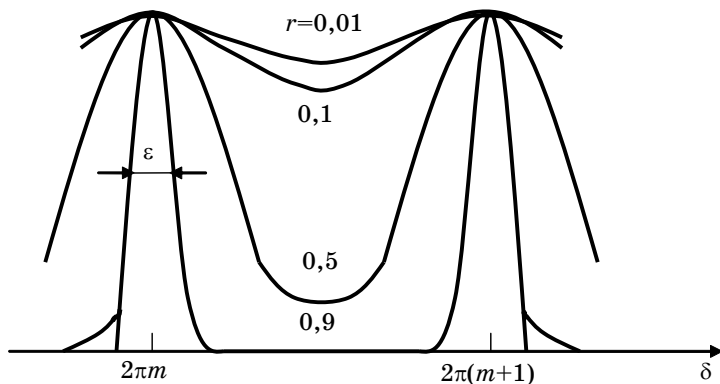


Рис. 6.4. Распределение интенсивности при многолучевой интерференции

С увеличением резкости полос распределение интенсивности становится более благоприятным для определения положения максимумов. Чем выше резкость полос, тем более четко разделяются полосы, принадлежащие различным спектральным составляющим падающего излучения. В реальных интерферометрах при коэффициенте отражения зеркал $r \approx 0,9$ резкость $F \approx 30$ и расстояние между двумя соседними максимумами в 30 раз больше ширины полосы каждого из них.

Оценим, на какой угол будут разведены два пучка света с длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$, т.е. определим дисперсию интерферометра D :

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (6.14)$$

Условием возникновения максимума интенсивности интерференционной картины является соотношение

$$\frac{\delta}{2} = \frac{2\pi nd \cos \varphi}{\lambda} = m\pi. \quad (6.15)$$

Дифференцируя его, получим

$$-2nd \sin \varphi d\varphi = m d\lambda$$

и окончательно

$$D = \left| \frac{d\varphi}{d\lambda} \right| = \frac{m}{2nd \sin \varphi}. \quad (6.16)$$

Как видно из выражения (6.16), дисперсия наибольшая для центрального кольца интерференционной картины, где угол ϕ минимален. Измерения обычно проводят в области второго или третьего кольца.

Основными факторами, которые не позволяют достичь предельно узких полос пропускания, являются непараллельность зеркал, наличие потерь в оптической системе, неравномерность поверхности зеркал. Несмотря на это, интерферометры Фабри — Перро применяются для измерения ширины линии излучения лазерных источников. Разрешающая способность интерферометра в основном зависит от коэффициента отражения зеркал и расстояния между ними. Поэтому настройка длины волны в интерферометре осуществляется регулировкой расстояния между зеркалами либо наклоном интерферометра относительно входного луча. Чтобы избежать неоднозначности при этих измерениях, диапазон изменений базы интерферометра не должен превышать расстояние, равное $\lambda/2$ источника излучения. Обычно для перемещения одного из зеркал используют пьезоэлектрическую керамику.

6.3. Анализаторы оптического спектра на основе дифракционной решетки

Анализаторы спектра на основе дифракционной решетки, используемой в качестве перестраиваемого оптического фильтра, наиболее часто применяются в волоконной оптике. Типичная оптическая система анализатора спектра с дифракционной решеткой приведена на рис. 6.5.

Совокупность элементов оптической системы — входное отверстие, дифракционная решетка, выходное отверстие, зеркала (Z_1 и Z_2) — служит для разделения входного оптического излучения на спектральные составляющие и называется монохроматором. В монохроматоре дифракционная решетка выводит дифрагированный свет под углом, зависящим от длины волны. В видимом диапазоне для пространственного разделения света в зависимости от длины волны зачастую служит призма, но в инфракрасном излучении, используемом в ВОСП, применение призм неэффективно, так как изменение показателя преломления стекла в зависимости от длины волны в

диапазоне 1–2 мкм очень мало. Поэтому в анализаторах спектра для телекоммуникационных систем используют дифракционные решетки, которые обеспечивают лучшее разделение по длинам волн, т.е. лучшую разрешающую способность. Монохроматор вместе с фотодиодом, который фиксирует интенсивность излучения, называется спектрометром.

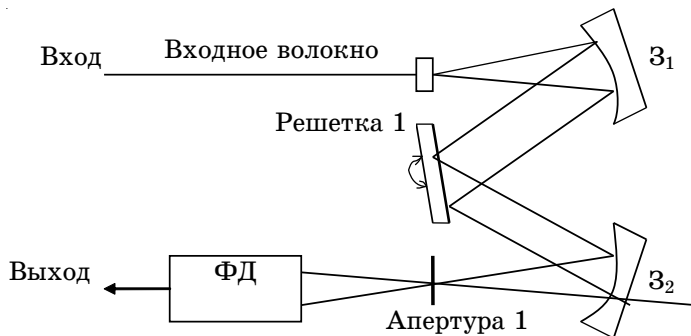


Рис. 6.5. Оптическая система анализатора оптического спектра с однопроходным монохроматором

Дифракционная решетка, используемая в анализаторах оптического спектра, представляет собой расположенные последовательно через равные промежутки параллельные щели (в случае пропускающей решетки) или зеркала (в случае отражающей).

Пусть на пропускающую решетку из N щелей с периодом d и размером щелей b падает плоская монохроматическая волна. Будем считать, что N — большое число. Рассмотрим распределение интенсивности при дифракции в параллельных лучах от такой решетки. Найдем интенсивность I_φ в направлении, составляющем угол φ с нормалью к плоскости решетки.

От элемента dx n -й щели в направлении оси z' распространяется волна

$$dE_\varphi = \frac{E_0 dx}{b} e^{i[\omega t - [k(n-1)d + kx] \sin \varphi]}, \quad (6.17)$$

где E_0 — амплитуда напряженности электрического поля падающей на решетку волны; $k(n-1)d \sin \varphi$ — запаздывание по фазе волны от n -й щели по отношению к первой щели;

$kx \sin \varphi$ — запаздывание по фазе волны от элемента dx n -й щели по отношению к $(n-1)$ -й щели.

Обозначим через $E_{1\varphi}$ напряженность поля в направлении оси z' , создаваемую первым структурным элементом решетки. Для первой щели поле $E_{1\varphi}$ определяется суммированием волн от всех элементарных участков щели и выражается формулой

$$E_{1\varphi} = \frac{E_0 e^{i\omega t}}{b} \int_0^b e^{-ikx \sin \varphi} dx = E_0 e^{i\omega t} \frac{\sin u}{u}, \quad (6.18)$$

где $u = \pi b \sin \varphi / \lambda$.

Напряженность $E_{2\varphi}$, создаваемая в направлении оси z' второй щелью, отличается от $E_{1\varphi}$ только множителем $\exp(i\delta)$, выражающим запаздывание этой волны по фазе. Напряженность от третьей щели имеет вид $E_{3\varphi} = E_{1\varphi} \exp(2i\delta)$ и т.д. При нормальном падении монохроматической волны на плоскость решетки (рис. 6.6) разность хода соседних пучков $\Delta = d \sin \varphi$, откуда

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi d \sin \varphi}{\lambda}. \quad (6.19)$$

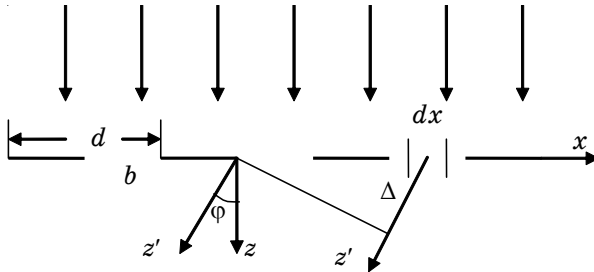


Рис. 6.6. Дифракционная пропускающая решетка

Полная напряженность поля в направлении оси z' , создаваемая всеми N щелями решетки, представляется суммой геометрической прогрессии:

$$E_{\varphi} = E_{1\varphi} \left[1 + e^{i\delta} + e^{i2\delta} + \dots + e^{i(N-1)\delta} \right] = E_{1\varphi} \frac{1 - e^{iN\delta}}{1 - e^{i\delta}}. \quad (6.20)$$

Умножая правую часть (6.20) на комплексно-сопряженное, получаем выражение для интенсивности света в направлении оси z'

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \left(\frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \right)^2, \quad (6.21)$$

где $I_0 (\sin u/u)^2$ — интенсивность от одной щели, а последний множитель в (6.21) учитывает интерференцию между пучками от всех щелей.

В результате интерференции N когерентных вторичных волн происходит перераспределение светового потока по направлениям. В тех направлениях φ , для которых $\delta/2 = m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), второй сомножитель в (6.21) принимает значения N^2 :

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 N^2,$$

и интенсивность в N^2 раз больше, чем от одной щели в том же направлении. Это результат того, что разность хода вторичных волн для этих направлений равна целому числу длин волн и все они приходят в точку наблюдения в фазе. В отсутствие интерференции суммарная интенсивность в этих направлениях была бы пропорциональна числу щелей N . Максимумы, возникающие при выполнении условия $\delta/2 = m\pi$, называются главными максимумами. Они появляются, когда одновременно $\sin(N\delta/2)$ и $\sin(\delta/2)$ равны нулю. Между главными максимумами возникает $N-1$ минимумов, когда $\sin(N\delta) = 0$, но $\sin\delta \neq 0$. Между минимумами есть дополнительные максимумы, в которых интенсивность света мала по сравнению с интенсивностью главных максимумов. При увеличении числа дифрагировавших пучков ($N = 200000$ в современных решетках) главные максимумы становятся резкими, а интенсивность в промежутках между ними можно считать равной нулю. График функции $\sin^2(N\delta/2)/\sin^2(\delta/2)$ приведен на рис. 6.7.

Рассмотрим роль второго сомножителя в формуле (6.21), для чего исследуем функцию $\sin^2(u)/u^2$, где $u = pbs\sin\varphi/\lambda$. Этот множитель дает минимумы при тех значениях функции u , которые кратны π : $u = m\pi$, где $m = 1, 2, 3, \dots$. В результате совместного действия интерференции N пучков и дифракции от щели получим картину распределения интенсивности, представленную на рис. 6.8.

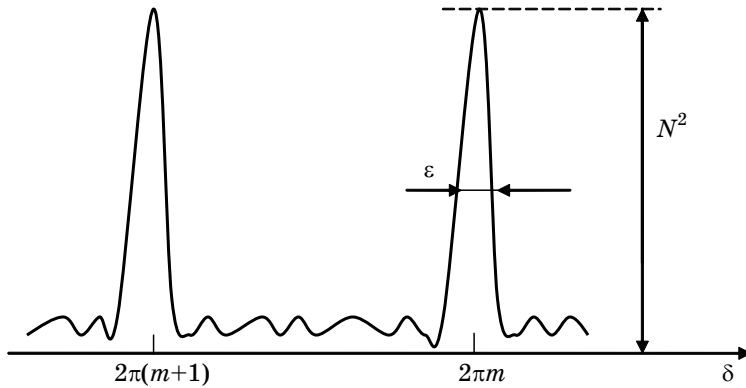


Рис. 6.7. Распределение интенсивности при интерференции N световых пучков

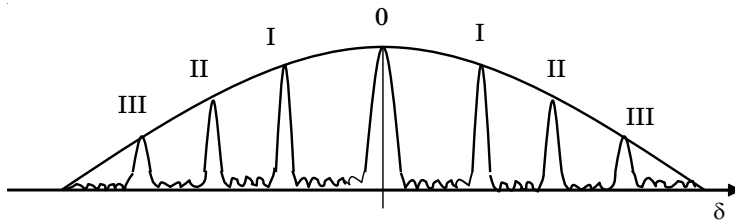


Рис. 6.8. Результат совместного действия интерференции N пучков и дифракции от щели

Для дальнейшего анализа учтем, что

$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{d},$$

и функцию u можно записать в виде

$$u = \frac{\pi b}{\lambda} \frac{m\lambda}{d} = \pi m \frac{b}{d}. \quad (6.22)$$

В этом случае выражение для интенсивности главных максимумов можно представить в виде

$$I_m = I_0 N^2 \frac{d^2}{(\pi b m)^2} \sin^2 \left(\frac{\pi m b}{d} \right). \quad (6.23)$$

Анализ формулы (6.23) показывает, во-первых, что интенсивность главных максимумов пропорциональна $1/m^2$, т.е. с увеличением порядка дифракции интенсивность главных максимумов уменьшается пропорционально m^2 . Во-вторых, интенсивность света в m -м максимуме зависит от отношения b/d . При $bm/d = m'$, где m' — целое число, синус в (6.23) обращается в нуль и интенсивность m -го главного максимума равна нулю. Особый интерес представляет случай, когда решетка образована системой щелей шириной $b = d/2$. В этом случае в распределении интенсивности можно учитывать лишь три главных максимума — нулевой и два первых при $m = \pm 1$.

Направления на главные максимумы зависят от длины волны (за исключением случая $m = 0$). Поэтому решетка разлагает падающее некогерентное излучение в спектры нескольких порядков и может использоваться в качестве диспергирующего элемента в спектральных приборах.

Для обычной щелевой решетки интегральная интенсивность дифрагировавшего света распределена между всеми главными максимумами и только малая часть падающего света попадает в какой-нибудь один порядок с $m \neq 0$. У современных решеток штрихам придают определенный профиль. Это позволяет сконцентрировать большую часть энергии дифрагировавшего света в одном или двух главных максимумах, лежащих по одну сторону от центрального.

Оценим, на какой угол будут разведены два диспергирующих пучка света с длинами волн λ_1 и $\lambda_2 = \lambda_1 + d\lambda$, т.е. определим угловую дисперсию решетки

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (6.24)$$

Будем исходить из условия возникновения главного максимума при нормальном падении света на решетку

$$d \sin \varphi = m\lambda. \quad (6.25)$$

Дифференцируя, получим

$$d \cos \varphi d\varphi = m d\lambda$$

и окончательно

$$D = \left| \frac{d\varphi}{d\lambda} \right| = \frac{m}{d \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi}{\lambda \cos \varphi} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}. \quad (6.26)$$

Таким образом, угловая дисперсия при заданном значении угла дифракции не зависит от периода и других параметров решетки. Она растет с увеличением угла дифракции φ . Для спектра определенного порядка m дисперсия тем больше, чем меньше период решетки d . Очевидно, что дисперсия дифракционной решетки изменяется с длиной волны. Это приводит к снижению разрешающей способности монохроматора. Некоторые спектроанализаторы имеют специальные устройства, корректирующие влияние этого эффекта.

Наряду с дисперсией, для характеристики способности прибора разлагать излучение на составляющие вводят понятие разрешающей силы решетки. Разрешающая сила решетки определяется отношением $\lambda/\delta\lambda$, где $\delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ — разность длин волн между двумя максимумами, для которых выполняется критерий Рэлея (рис. 6.9). Согласно критерию Рэлея две спектральные линии равной интенсивности различимы, если максимум первой с длиной волны λ_1 совпадает с ближайшим минимумом второй с длиной волны λ_2 .

Для вычисления разрешающей силы дифракционной решетки рассмотрим максимумы, выделенные дифракционной решеткой с числом штрихов N . Пусть максимуму излучения с длиной волны λ_1 соответствует угол дифракции φ' , а максимуму излучения с длиной волны λ_2 — φ'' . Условия возникновения главных максимумов:

$$\begin{aligned} d \sin \varphi'_{\max} &= m \lambda_1, \\ d \sin \varphi''_{\max} &= m \lambda_2. \end{aligned}$$

Известно, что между двумя главными максимумами располагается $N-1$ минимум. Условие возникновения первого минимума спектральной линии с длиной волны λ_2 :

$$d \sin \varphi''_{\max} = (m + 1/N) \lambda_2.$$

Согласно критерию Рэлея $\varphi'_{\max} = \varphi''_{\min}$, т.е.

$$m \lambda_1 = m \lambda_2 + \lambda_2 / N,$$

откуда

$$\lambda / (\lambda_2 - \lambda_1) = mN. \quad (6.27)$$

Левую часть равенства (6.27) с достаточной точностью можно записать в виде

$$\lambda / \delta\lambda = mN. \quad (6.28)$$

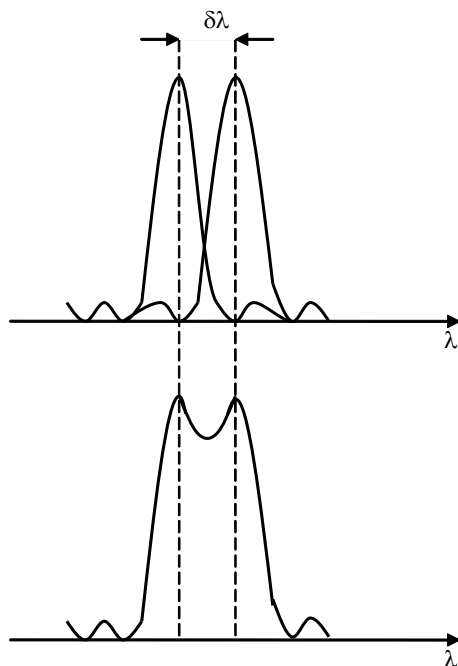


Рис. 6.9. Критерий Рэлея

Отметим, что разрешающая сила дифракционной решетки в спектре заданного порядка m определяется только полным числом штрихов N , в отличие от дисперсии, которая зависит от периода d , т.е. от числа штрихов на единицу длины решетки. При заданном значении постоянной решетки d разрешающая способность решетки возрастает с увеличением длины ее рабочей области.

Таким образом, эффективность дифракционной решетки как оптического фильтра зависит от числа штрихов на 1 мм, общего числа освещенных линий решетки, угла дифракции, длины измеряемой волны, а эффективность спектроанализатора в целом — от размеров входной и выходной апертур, а также качества коллимирующих оптических компонентов.

6.4. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток

Однопроходный монохроматор (см. рис. 6.5) состоит из входного отверстия, фокусирующей системы, дифракционной решетки, коллимирующей системы, выходного отверстия. Входное отверстие, выходное отверстие и количество освещенных на дифракционной решетке линий являются ключевыми факторами, обеспечивающими минимальную ширину полосы пропускания. Следовательно, важно иметь высококачественную оптическую систему с минимальной выходной апертурой. Изменяя угол падения на дифракционную решетку, можно настроить спектроанализатор на определенную длину волны. Для вращения дифракционной решетки используются очень точные редукторы с прецизионными следящими системами. Угол наклона дифракционной решетки тщательно контролируется. Разрешающая способность такого монохроматора составляет $\Delta\lambda \approx 0,1$ нм при $\lambda = 1550$ нм. Повысить избирательность монохроматора можно за счет увеличения диаметра светового пучка и размеров дифракционной решетки, но это приводит к увеличению габаритов устройства. Более эффективным способом повышения избирательности является каскадное соединение двух монохроматоров (рис. 6.10).

Сдвоенный монохроматор эквивалентен паре однопроходных, но его реализация требует точной настройки соединения монохроматор — монохроматор, и поэтому такие схемы практически не используются.

Альтернативой рассмотренному является двухпроходной монохроматор (рис. 6.11).

В его схеме сочетаются достоинства широкого динамического диапазона сдвоенного монохроматора при улучшенной избирательности одиночного монохроматора, так как дифракционная решетка и коллимирующая система используются дважды по ходу светового луча.

В соответствии со схемой коллимированный входной пучок света попадает на дифракционную решетку. Выделенная длина волны поворотом дифракционной решетки согласуется с апертурой, ширина которой определяет полосу пропускания. Отфильтрованный свет вновь через коллимирующую систему посылается на дифракционную решетку. Второй проход при-

водит к более высокому разрешению, чем у однопроходного монохроматора, и расширяет динамический диапазон как у двойного.

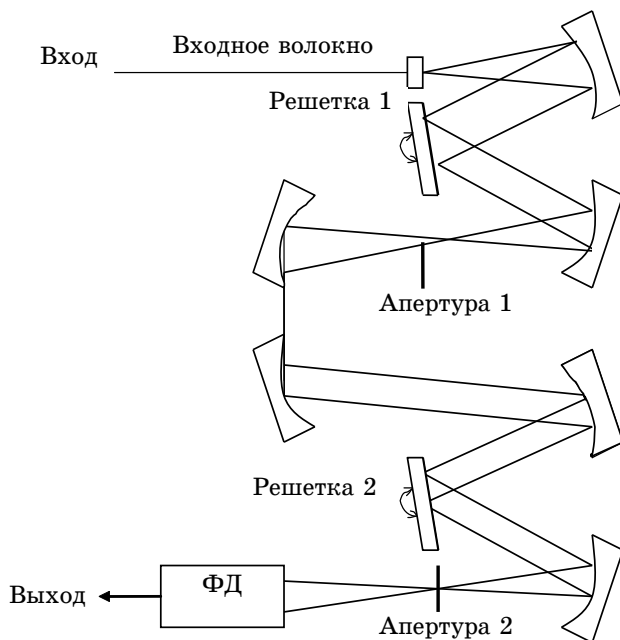


Рис. 6.10. Оптическая система анализатора оптического спектра на двойном монохроматоре

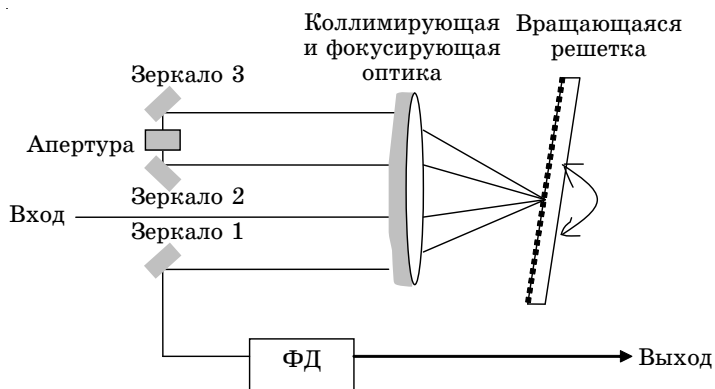


Рис. 6.11. Оптическая система анализатора оптического спектра на двухпроходном монохроматоре

В отличие от рассмотренного выше классического монохроматора, в другой схеме — монохроматоре Литтмана — дифракционная решетка обеспечивает большую угловую дисперсию длины волны за счет освещения под очень малым углом (рис. 6.12).

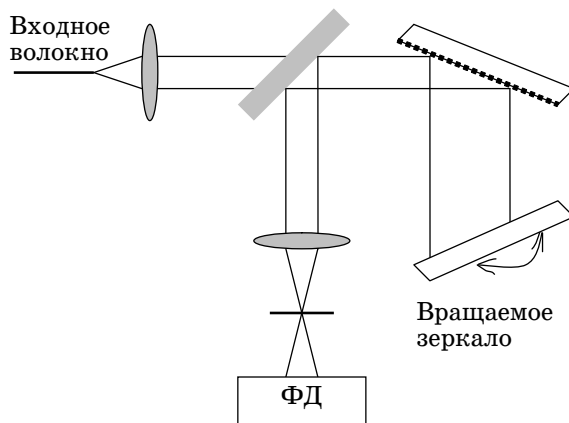


Рис. 6.12. Оптическая система анализатора оптического спектра на двойном монохроматоре Литтмана

Дифрагированный решеткой свет отражается зеркалом вновь на решетку для второго прохода и затем фокусируется на выходном отверстии оптической системы. Основное преимущество конфигурации Литтмана заключается в высоком разрешении при небольших размерах монохроматора. Решетка размещена под небольшим углом, и для полного ее освещения достаточно малого диаметра коллимированного светового пучка. Для выбора длины волны в конфигурации Литтмана требуется поворачивать не решетку, а зеркало, которое может быть выполнено в виде уголкового отражателя.

В табл. 6.1 приведены основные характеристики анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток, которые предназначены для анализа спектра в полевых условиях (ФТВ-5200) и в системе калибровки средств измерений волоконной оптики (ФТВ-5220).

Таблица 6.1

Характеристики анализаторов оптического спектра
на дифракционных решетках

Параметры	ФТВ-5200	ФТВ-5220
Линейность/точность шкалы:		
до -40 дБм	±0,3	±0,3
от -40 до -50 дБм	±0,6	±0,6
от -50 до -60 дБм	±1	±1
Повторяемость, дБ	±0,2	±0,2
Динамический диапазон, дБ:		
±3 нм	45	45
±1 нм	35	35
Зависимость от поляризации, дБ	±0,05	±0,1
Оптический ввод	Есть	Есть
Возвратные потери, дБ	Менее -40	Более -38
Спектральные измерения		
Диапазон длин волн, нм	1525–1570	1525–1570
Разрешение по длине волны, нм	0,01	0,007
Измерение амплитуды		
Диапазон отображения, дБм	–	от +20 до -70
Разрешение, дБ	–	0,02
Абсолютная погрешность (-20 дБм, 1550 нм), дБ	±0,4	±0,5

6.5. Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны

Анализаторы оптического спектра измеряют длину волны света в воздухе, представляя результат измерения в терминах длин волн или оптической частоты. Поскольку показатель преломления воздуха зависит от температуры, давления и влажности, необходимо точно устанавливать значения показателя преломления при проведении измерений. Например, при $\lambda = 1550$ нм на уровне моря, температуре 15°C и отсутствии влажности показатель преломления воздуха составляет 1,000273. Преобразование длины волны в вакууме в длину

волны в воздухе без учета реального показателя преломления приведет к ошибке в 0,4 нм. Если интервалы между каналами составляют порядка 1 нм (как, например, в системах DWDM), то эта ошибка становится значительной.

Все анализаторы оптического спектра требуют периодической калибровки, так как наличие механических частей в них влияет на точность установки длины волны. Одним из способов калибровки спектроанализатора является калибровка по источнику излучения с известной длиной волны. На одной длине волны калибровка может быть проведена в соответствии с длинами волн гелий-неонового лазера. Такая односточечная калибровка отличается высокой точностью, но начиная с этой точки ошибки могут накапливаться. Другой метод калибровки основан на применении перестраиваемого лазера, контролируемого с помощью измерителя длины волны. Этот метод позволяет проводить калибровку в широком диапазоне длин волн, но из-за использования высокоточного перестраиваемого источника излучения он достаточно дорогостоящий.

Еще одним методом калибровки является калибровка по линиям поглощения газообразных веществ, поскольку линии газов являются природными константами. Линии поглощения около важной волоконно-оптической полосы 1550 нм имеют ацетилен и цианид водорода, вакуумные длины волн которых были измерены с точностью 0,001 нм. В процессе калибровки свет от широкополосного источника проходит через стеклянную трубку, содержащую молекулярный газ. Газ поглощает излучение около резонансной частоты молекул, а результирующий свет собирается и проходит на анализатор оптического спектра.

6.6. Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением

Предположим, что тестируемый лазер работает в режиме одной продольной моды, при котором все частоты лазерного резонатора, кроме основной моды, подавляются. Ширина линии современного полупроводникового лазера с непрерывным излучением не превышает 10 МГц, или в длинах волн $\Delta\lambda = 0,0001$ нм. Типовой спектроанализатор на дифракционной

решетке имеет разрешающую способность $\Delta\lambda = 0,01-0,1$ нм. Таким образом, чтобы измерить ширину линии однододового лазера, требуется тысячекратное улучшение разрешающей способности спектроанализатора. В то же время из-за фазового шума, обусловленного спонтанными переходами в полупроводниковом лазере, и вследствие модуляции лазера по интенсивности происходит увеличение ширины спектра излучения лазера. Поскольку показатель преломления оптического волокна зависит от длины волны излучателя, наличие этих изменений может привести к непредусмотренному расплыванию оптических импульсов и межсимвольной интерференции в высокоскоростных цифровых линиях связи. В связи с этим для решения задач измерения спектральных характеристик с высоким разрешением были разработаны интерференционные методы, основанные на оптическом смешении световых волн.

Гетеродинный метод измерения спектральных характеристик. Пусть на вход фотодиода (рис. 6.13) воздействует оптический сигнал с напряженностью поля

$$E_S(t) = \sqrt{I_S(t)} e^{i[2\pi f_S t + \varphi_S(t)]}, \quad (6.29)$$

где $I_S(t) = |E_S(t)|^2$ — интенсивность оптического сигнала; f и $\varphi(t)$ — частота и фаза оптического поля, причем в фазе $\varphi(t)$ учтены фазовый шум и модуляция оптической частоты.

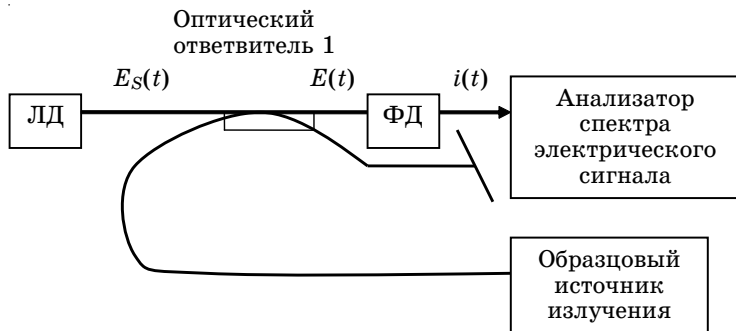


Рис. 6.13. Гетеродинное детектирование оптического сигнала

Полная фаза $2\pi f t + \varphi(t)$ оптического поля изменяется очень быстро (при $\lambda = 1550$ нм, например, изменения происходят с частотой 194000 ГГц). Электронное оборудование не успевает

зарегистрировать эти изменения. Чтобы получить спектр входного оптического сигнала, возьмем второй оптический генератор с частотой f_L ниже частоты входного сигнала и напряженностью поля

$$E_L(t) = \sqrt{I_L(t)} e^{i[2\pi f_L t + \phi_L(t)]}. \quad (6.30)$$

Оптические поля двух генераторов объединяются в оптическом ответвителе, пространственно накладываясь друг на друга. Напряженность суммарного оптического поля на входе фотодиода будет

$$E_\Sigma = E_S + E_L,$$

а ток фотодиода

$$i(t) = \gamma |E_\Sigma(t)|^2,$$

где γ — чувствительность детектора.

Подставив в последнее выражение значения полей E_S и E_L , получим:

$$i(t) = \gamma \left[I_S(t) + I_L(t) + 2\sqrt{I_S I_L} \cos(2\pi f_R t + \Delta\phi(t)) \right]. \quad (6.31)$$

Первые два члена в выражении (6.31) характеризуют интенсивности сигналов E_S и E_L , третий член представляет собой результат гетеродинного смешения, в результате которого члены с действительной оптической частотой отсутствуют, а остается лишь член с разностной частотой $f_R = f_S - f_L$. Таким образом, мы транспонируем спектр с высоких оптических частот на частоты, которые могут быть измерены обычными электронными средствами, например электрическим анализатором спектра.

Гетеродинный метод дает возможность измерить ширину линии излучателя, спектр оптической мощности и может быть использован при измерениях спектра модулированного лазерного излучения.

Метод обладает высокими чувствительностью и спектральным разрешением. Высокая чувствительность обеспечивается большой мощностью эталонного генератора. Однако тепловой шум приемника, дробовой шум эталонного генератора, шумы интерференции вследствие оптических отражений в схеме измерения могут существенно снизить чувствительность измерений.

Высокое спектральное разрешение обеспечивается использованием высокостабильного эталонного лазера с узкой шири-

ной линии. Измеренный спектр представляет собой свертку спектра мощности сигнала со спектром мощности эталонного генератора. Это устанавливает минимальное спектральное разрешение, равное ширине линии излучения эталонного лазера. Для типового полупроводникового лазера с внешним резонатором ширина спектра излучения составляет около 100 кГц, но может быть произвольно увеличена из-за изменений характеристик резонатора вследствие изменения условий окружающей среды.

Автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик. Модификацией гетеродинного метода измерения ширины спектра излучения лазера является автогетеродинный метод измерения (рис. 6.14). Этот метод измерения состоит в создании задержки оптического сигнала с помощью оптического волокна и последующего смещения прямого и задержанного сигналов.

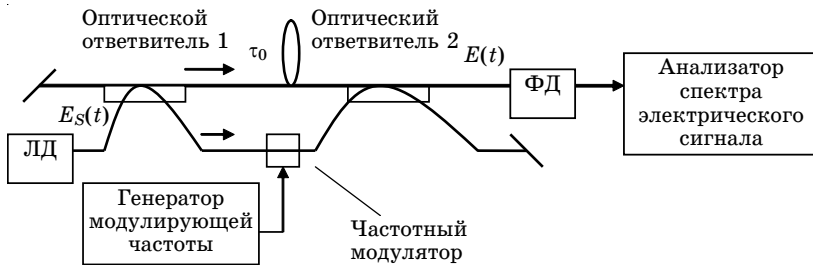


Рис. 6.14. Автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик

Выходное излучение лазерного диода ЛД делится на два луча, частота одного из которых смещена относительно другого с помощью частотного модулятора на величину δf . Если задержка одного луча τ_0 превышает время когерентности лазера τ_c , то лучи не дают интерференционной картины и взаимодействуют так, будто бы они исходят от двух разных источников света. Минимальная задержка τ_0 должна быть меньше $1/\Delta f$, где Δf — ширина спектра лазерного излучателя. При выполнении этого условия система функционирует аналогично рассмотренному выше принципу. Электронный анализатор спектра отображает свертку спектров мощности самого сигнала и сигнала, смещенного по частоте на величину δf .

Смещение частоты может быть получено при помощи различных устройств, например при помощи акустооптического фазового модулятора. Для ширины линии лазерного излучения порядка 10 МГц необходимое время задержки составляет около 100 нс, что соответствует 20 м одномодового волокна.

Достоинства автогетеродинного метода измерения заключаются в отсутствии эталонного генератора и меньшей, чем в гетеродинном методе, чувствительности к медленным колебаниям длины волны. Методами гетеродинирования осуществляются измерения ширины спектра в диапазоне от 10 кГц до 1 ГГц.

7. Измерение дисперсии

7.1. Виды дисперсии

В волоконной оптике различают три вида дисперсии: межмодовую дисперсию, хроматическую дисперсию и поляризационную модовую дисперсию. Наличие дисперсии любого вида ухудшает амплитудно-фазовые характеристики световых сигналов и снижает объем передаваемой информации либо за счет увеличения длительности импульсов в цифровых системах, либо за счет увеличения искажений сигналов в аналоговых системах. При разработке ВОСП дисперсию необходимо минимизировать, а следовательно, измерять.

Методы измерения дисперсии оптических волокон, компонентов ВОСП и систем ВОСП разработаны ведущими группами по стандартизации, такими как Ассоциация телекоммуникационной индустрии и ее международные отделения.

7.2. Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия возникает из-за различия времени пробега распространяющихся по волокну мод. Согласно геометрической интерпретации распространение светового импульса по многомодовому волокну может быть представлено в виде набора аксиальных и наклонных лучей, каждый из которых соответствует определенной моде (рис. 7.1).

Время пробега аксиальным лучом расстояния L определяется выражением

$$t_a = \frac{L}{V_\phi} = \frac{Ln_c}{c}, \quad (7.1)$$

где V_ϕ — фазовая скорость; n_c — показатель преломления сердцевины; c — скорость света в вакууме.

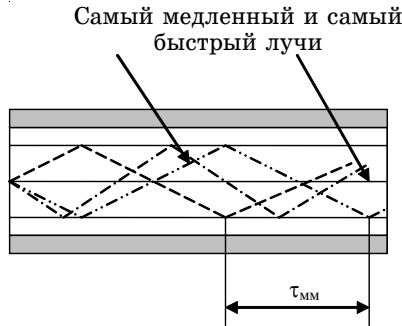


Рис.7.1. Распространение светового импульса по многомодовому волокну

Время пробега того же расстояния L наклонным лучом с максимально возможным значением критического угла $\theta_{кр}$ составляет

$$t_H = \frac{Ln_c}{c \cos \theta_{кр}} = \frac{n_c^2 L}{n_u c}, \quad (7.2)$$

где n_u — показатель преломления оболочки.

Когда эти два луча, переносящие световую энергию, складываются на выходе световода, наклонный луч имеет временное запаздывание τ_{MM} :

$$\tau_{MM} = t_H - t_a = \frac{n_c L}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (7.3)$$

При этом запаздывание на единицу длины пути будет

$$\frac{\tau_{MM}}{L} = \frac{n_c}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (7.4)$$

Для типичного волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, имеющего $n_c = 1,5$ и разность показателей преломления сердцевин и оболочки $\Delta n \approx 0,01$, временная задержка τ_{MM} между самым быстрым и самым медленным лучами составляет около 50 нс/км. Различие времени пробега распространяющихся по волокну мод приводит к искажению формы (расширению) выходного импульса по сравнению с входным. В многомодовых световодах со ступенчатым профилем показателя преломления вклад межмодовой дисперсии

является основным в расширении импульсов передачи и ограничении ширины полосы пропускания.

Межмодовую дисперсию многомодового световода можно уменьшить, используя градиентные волокна с плавным изменением профиля показателя преломления. За счет уменьшения показателя преломления в направлении от оси ОВ к оболочке скорость распространения лучей, удаленных от оси, увеличивается и время распространения аксиальных и наклонных лучей выравнивается. При оптимальном профиле показателя преломления, близком к параболическому, значение межмодовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{\text{ММ}} = t_{\text{н}} - t_{\text{а}} = \frac{n_{\text{с}}L}{8c} (n_{\text{с}} - n_{\text{у}})^2. \quad (7.5)$$

При этом временная задержка $\tau_{\text{ММ}}$ между самым быстрым и самым медленным лучами при $n_{\text{с}} = 1,5$ и $\Delta n \approx 0,01$ уменьшается до 62,5 пс/км.

Частотные свойства многомодовых волокон из-за преобладания межмодовой составляющей дисперсии мало зависят от спектральных свойств источника излучения. Поэтому их удобно оценивать коэффициентом широкополосности B (МГц·км), который является эквивалентом дисперсии в частотной области. Для пересчета коэффициента широкополосности в дисперсию и обратно можно использовать соотношение

$$B = \frac{1}{\tau_{\text{ММ}}}. \quad (7.6)$$

Современные многомодовые волокна имеют на основных рабочих длинах волн типовое значение коэффициента широкополосности $B = 200 \dots 1000$ МГц·км.

7.3. Измерение межмодовой дисперсии

Межмодовая дисперсия вызывает изменение формы импульсов и обычно ограничивает расстояние передачи многомодового кабеля до 1 км и менее, обеспечивая битовую скорость не более 1 Гбит/с. Для аттестации и сопоставления дисперсионных свойств многомодовых волокон необходимо стандартизовать условия измерения. В первую очередь это относится

к способам оптического возбуждения, которые должны обеспечить повторяемость результатов при измерении дисперсии. Стандартизованным способом возбуждения при измерении дисперсии является равновесное возбуждение мод, поскольку оно создает условия, наименее благоприятные для распространения, и обеспечивает максимальную дисперсию [4]. Обычно на входе оптического волокна устанавливают устройство скремблирования, которое задает режим возбуждения большого количества мод. Кроме того, необходимо устранить распространение мод по оболочке.

Метод измерения межмодовой дисперсии по искажению импульса. Дисперсионные свойства световода можно характеризовать искажениями, которые претерпевает распространяющийся в нем оптический импульс. В соответствии со схемой измерений (рис. 7.2) в световод посылается импульс, меньший по длительности ожидаемого отклика, и измеряется уширение импульса при его распространении. Источник излучения подключается через скремблер к входу тестируемого оптического волокна. К выходу волокна подключается приемник излучения, соединенный со стробоскопическим осциллографом, по которому и определяется длительность импульса.

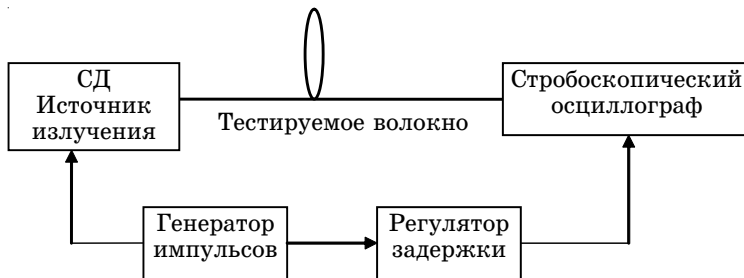


Рис. 7.2. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна импульсным методом

Затем таким же образом измеряется входной импульс. Здесь вместо тестируемого волокна используется эталонное, которое представляет собой короткий, в несколько метров, отрезок тестируемого волокна. Для минимизации разницы в задержке распространения импульсов в тестируемом и эталонном волокнах осциллограф синхронизируется входным импульсом через регулируемый элемент задержки. Если импульсы на

выходе и входе волокна имеют гауссову форму, то дисперсию определяют согласно выражению

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{вых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}, \quad (7.7)$$

где $\tau_{\text{вых}}$ и $\tau_{\text{вх}}$ — соответственно длительности импульсов на выходе и входе волокна, измеренные на уровне 0,5 максимальной интенсивности.

Для того чтобы на результаты измерений не оказывала влияние хроматическая дисперсия, спектр источника излучения должен быть достаточно узким.

По мере совершенствования технологий изготовления оптоволокна и улучшения его характеристик все меньшими становятся искажения, вносимые волокном в световой импульс. Кроме того, чтобы реализовать высокую скорость передачи информации, используют импульсы субнаносекундной длительности, что создает дополнительные трудности при регистрации и обработке оптических сигналов. Поэтому для повышения точности измерений используют более сложную обработку оптических импульсов, связанную с переходом в частотную область и нахождением передаточной функции. Известно, что если на вход линейной системы с постоянными коэффициентами подается импульс конечной формы, то отклик системы характеризуется интегральной операцией свертки

$$P_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_f(t - \tau) P_0(\tau) d\tau,$$

где $P_L(t)$ — мощность выходного импульса; $P_0(\tau)$ — мощность входного импульса; $g_f(t)$ — импульсный отклик системы.

Представление временного сигнала $P(t)$ в частотной области, используя преобразование Фурье, можно записать в виде

$$H_L(\omega) = h(\omega) H_0(\omega), \quad (7.8)$$

где $H_L(\omega)$, $H_0(\omega)$ — фурье-преобразования выходного $P_L(t)$ и входного $P_0(t)$ импульсов; $h(\omega)$ — частотная функция импульсного отклика $g_f(t)$ исследуемой системы.

Функция $g_f(t)$ дает полное представление о системе (т.е. об оптическом волокне) во временной области, функция $h(\omega)$ — в частотной.

При измерениях дисперсии оптического волокна входной и выходной импульсы преобразуются в цифровую форму, начиная с уровня 0,01 их максимальной амплитуды, и поступают

в персональный компьютер (ПК). При обработке импульсных сигналов в ЭВМ осуществляется переход в частотную область и находится передаточная функция $h(\omega)$ из отношения входного и выходного сигналов. Для улучшения отношения сигнал/шум ЭВМ считывает и усредняет большое число входных и выходных импульсов. Переход в частотную область и нахождение фурье-спектров входного и выходного сигналов позволяет найти полосу пропускания волокна, определяемую как самая низкая частота, при которой функция $|h(\omega)|$ уменьшается до уровня 0,5.

Метод измерения межмодовой дисперсии в частотной области. Данный метод связан с измерением полосы пропускания многомодового волокна.

Непрерывное излучение оптического источника модулируется по амплитуде синусоидальным сигналом генератора качающейся частоты и вводится через устройство скремблирования в тестируемое волокно. Модулированные сигналы с входа и выхода волокна поступают на широкополосные оптические приемники, соединенные с осциллографом, который фиксирует соответствующую оптическую мощность $P_L(f)$ и $P_0(f)$ как функцию частоты модуляции. Входной сигнал определяется при помощи короткого эталонного волокна, что позволяет учесть влияние частотных характеристик измерительной системы. В результате измерений получают амплитудно-частотную характеристику вида

$$H(f) = \lg \left[\frac{P_L(f)}{P_0(f)} \right].$$

Полоса пропускания оптического волокна определяется как самая низкая частота модуляции, при которой $H(f)$ уменьшается на 3 дБ от значения на нулевой частоте.

На входе средний уровень интенсивности излучения и коэффициент амплитудной модуляции должны быть постоянными во всем диапазоне частот модуляции. Поэтому для уменьшения флуктуаций оптических параметров излучателя вводят внешний модулятор, что избавляет от спектрального смещения и шумов источника, зависящих от условий модуляции.

7.4. Хроматическая дисперсия

Под названием «хроматическая дисперсия» объединены две составляющие дисперсии:

- а) материальная дисперсия (зависимость коэффициента преломления материала световода от длины волны света);
- б) волноводная (внутримодовая) дисперсия (зависимость групповой скорости моды от длины волны света).

Материальная дисперсия является фундаментальной характеристикой материала световода. Любой сигнал, налагаемый на световую волну, распространяется не с фазовой скоростью волны

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{\beta},$$

где ω — частота; β — постоянная распространения, а с групповой скоростью, определяемой соотношением

$$V_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{d\beta}.$$

В недисперсионных средах фазовая скорость не зависит от частоты световой волны, вследствие чего групповая $V_{\text{гр}}$ и фазовая V_{ϕ} скорости одинаковы. Однако в дисперсионных средах, где показатель преломления является функцией частоты $n(\omega)$, фазовая и групповая скорости различаются. Групповая скорость в дисперсионной среде определяется выражением

$$V_{\text{гр}} = \frac{1}{d\beta/d\omega} = \frac{V_{\phi}}{1 - (\omega/V_{\phi})(dV_{\phi}/d\omega)}. \quad (7.9)$$

Для дисперсионной среды можно ввести групповой показатель преломления сердцевины $N_{\text{гр}}$:

$$N_{\text{гр}} = \frac{c}{V_{\text{гр}}} = c \frac{d\beta}{d\omega} = c \frac{d(\omega n/c)}{d\omega} = n + \frac{\omega dn}{d\omega}, \quad (7.10)$$

который зависит от частоты света.

Переходя от частоты ω к длине волны света λ и учитывая, что

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

находим

$$N_{\text{гр}} = n + \frac{2\pi c}{\lambda} \frac{dn}{d\lambda} \left(-\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (7.11)$$

Выразим групповую скорость через n и λ :

$$V_{\text{гр}} = \frac{c}{N_{\text{гр}}} = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}}.$$

Зная $V_{\text{гр}}$, определим время t распространения светового импульса через дисперсионную среду длиной L :

$$t = \frac{L}{V_{\text{гр}}} = \frac{NL}{c} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (7.12)$$

Как видно из последней формулы, время t определяется зависимостью показателя преломления среды n от длины волны света λ . У реальных источников света спектр излучения не бесконечно узкий, а составляет определенную ширину $\Delta\lambda$. Если среда дисперсионная, то скорость распространения спектральных составляющих источника излучения различна. В процессе распространения в волокне световой импульс расширяется и поступает на выход на протяжении интервала времени $\tau_{\text{м}}$, определяемого соотношением

$$\tau_{\text{м}} = \frac{dt}{d\lambda} \Delta\lambda = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (7.13)$$

Здесь необходимо отметить, что для кварцевого оптического волокна зависимость $d^2 n_c / d\lambda^2$ изменяет свой знак при длине волны $\lambda = 1,28$ мкм. Эта точка носит название нулевой материальной дисперсии.

Вторая составляющая хроматической дисперсии — волноводная (внутримодовая) дисперсия — обусловлена направляющими свойствами сердцевины оптического волокна, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения λ , что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия в первую очередь определяется профилем показателя преломления оптического волокна и пропорциональна ширине спектра излучения источника. Задержка частотных составляющих распространяющегося в волокне излучения за счет внутримодовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{\text{в}} = \Delta\lambda LM(\lambda), \quad (7.14)$$

где $M(\lambda)$ — удельная внутримодовая дисперсия.

В нормальных условиях материальная дисперсия преобладает над волноводной, причем они могут иметь противоположные знаки и различаться характером зависимости от длины волны. Это позволяет, варьируя профиль показателя преломления, получить нулевую хроматическую дисперсию на заранее заданной длине волны λ или же в определенной спектральной полосе за счет взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсий. Так как хроматическая дисперсия зависит от длины световой волны и, следовательно, от ширины спектра источника оптического излучения, она нормируется в пикосекундах на нанометр-километр (пс/(нм·км)).

Для измерения хроматической дисперсии одномодовых волокон и, как следствие, их широкополосности применяют метод измерения задержек во временной области.

7.5. Измерение хроматической дисперсии

Измерение хроматической дисперсии методом сдвига фаз. Схема измерения хроматической дисперсии по методу сдвига фаз приведена на рис. 7.3. В соответствии со схемой выходной сигнал перестраиваемого оптического источника с узкой полосой частот модулируется по интенсивности и подается на тестируемое волокно. С выхода волокна оптический сигнал поступает на измеритель фазы, который измеряет разность фаз прошедшего тестируемое волокно оптического сигнала и электрического сигнала, поступающего с генератора. Измерение фазы проводится на разных длинах волн по всему диапазону длин волн источника излучения и повторяется через определенные интервалы времени. Для измерения длины волны источника излучения может быть использован анализатор оптического спектра.

Данная схема измерений позволяет определить временную задержку $\tau\lambda$:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\varphi(\lambda)}{2\pi f_0},$$

где $\varphi(\lambda)$ — измеренный сдвиг фазы (рад); f_0 — рабочая частота модулятора (Гц).

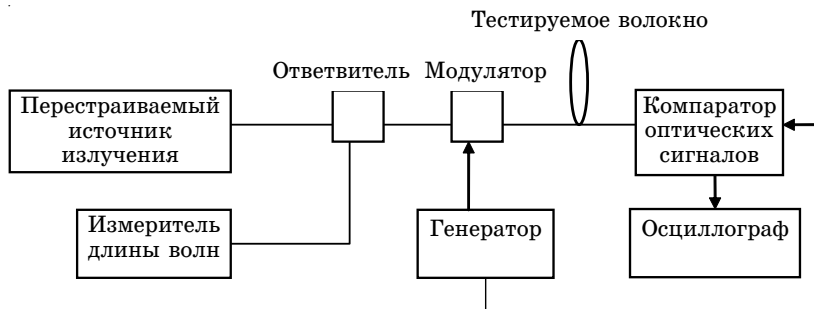


Рис. 7.3. Схема измерения хроматической дисперсии методом сдвига фаз

Пример зависимости временной задержки от длины волны источника излучения представлен на рис. 7.4.

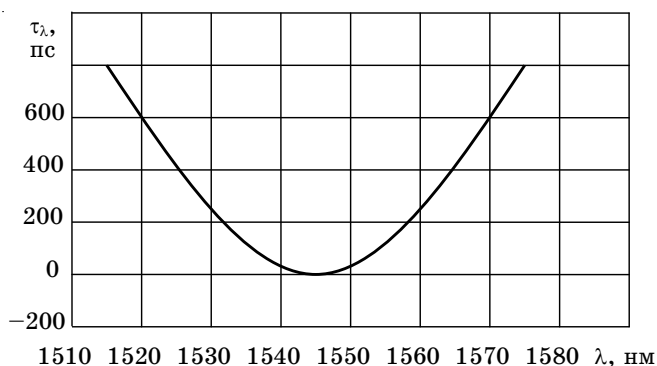


Рис. 7.4. Результаты измерения групповой задержки

На основе измеренных значений рассчитывают коэффициент хроматической дисперсии D_λ в зависимости от длины волны:

$$D_\lambda = \frac{1}{L} \frac{d\tau_\lambda}{d\lambda},$$

где L — длина оптического волокна, км; τ_λ — временная задержка, пс; λ — длина волны, нм.

Пример зависимости коэффициента хроматической дисперсии D_λ от длины волны источника излучения представлен на рис. 7.5.

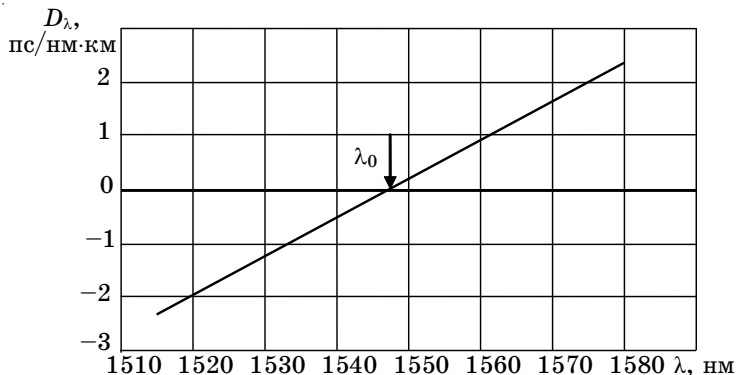


Рис. 7.5. Результаты расчета коэффициента дисперсии

Из последней формулы можно оценить увеличение длительности импульса $\Delta\tau$ в волокне:

$$\Delta\tau = D_\lambda \Delta\lambda L,$$

где $\Delta\lambda$ — ширина спектра модулированного светового сигнала, нм.

Таким образом, значение хроматической дисперсии возрастает в зависимости от увеличения длины линии передачи и ширины спектра сигнала, в связи с чем узкополосный сигнал с центральной длиной волны λ_0 может распространяться на большие расстояния с минимумом искажений, вызванных хроматической дисперсией.

Точность измерения хроматической дисперсии зависит от используемого оборудования. Например, нестабильность фазы и разрешение измерения фазы зависят от частоты модуляции. Поэтому приборы, предназначенные для измерения фазы, должны однозначно измерять ее в диапазоне $\pm 180^\circ$ в широкой полосе частот. Точность измерений длины волны также важна, так как сдвиг фазы пропорционален длине волны. В зависимости от целей измерения может оказаться достаточной точность измерения длины волны перестраиваемого источника, равная 0,1 нм, которую может обеспечить оптический фильтр. В высокоскоростных линиях требуется более высокая точность измерения длины волны.

К существенным ошибкам могут привести колебания температуры окружающей среды, которые ведут к изменению

длины L волокна и, следовательно, к изменению времени задержки при измерениях фазы. Влияние температуры в процессе измерения можно минимизировать путем чередования измерения фазы тестовой длины волны и эталонной длины волны. Изменения фазы эталонной длины волны вызваны только изменением температуры, и эти данные могут быть использованы для коррекции измерений фазы на тестируемой длине волны. Использование эталонной длины волны увеличивает точность измерений, но уменьшает их скорость.

Измерение хроматической дисперсии методом дифференциального сдвига фаз. При достаточно малом интервале длин волн $\Delta\lambda$ значение хроматической дисперсии может быть определено методом дифференциального сдвига фаз. Суть метода заключается в измерениях временной задержки τ_T тестируемого волокна и временной задержки τ_ε эталонного волокна. Реперный сигнал при измерении сдвига фазы поступает от генератора. Значения хроматической дисперсии (пс/нм·км) определяются как среднее значение дисперсии на интервале $\Delta\lambda$ по формуле

$$D_{\lambda_0} = \frac{\Delta\varphi_T - \Delta\varphi_{\varepsilon T}}{360f_M L \Delta\lambda} \times 10^{12},$$

где $\Delta\lambda$ — интервал длин волн с центром λ_0 , нм; $\Delta\varphi_\varepsilon$ и $\Delta\varphi_T$ — измеренное изменение фазы эталонного и тестируемого волокна, градус; f_M — частота модуляции, Гц; L — длина тестируемого волокна минус длина эталонного волокна, км.

Дисперсия как функция длины волны измеряется путем повторения процесса на различных длинах волн.

Измерение результирующей хроматической дисперсии в ВОСП дает важную информацию для проектирования и построения высокоскоростных систем, работающих на большие расстояния. В первую очередь это связано с тем, что линия передачи состоит, как правило, из множества волокон разных производителей, причем каждое волокно имеет свой коэффициент дисперсии и свою длину волны нулевой дисперсии. Поэтому в одноканальной системе при последовательном соединении волокон с различной хроматической дисперсией общая хроматическая дисперсия может быть сведена к нулю.

Измерения хроматической дисперсии проводятся в процессе испытаний при производстве оптических волокон, а также

при производстве и входном контроле компонентов ВОСП. В полевых условиях хроматическая дисперсия измеряется в связи с настройкой новых ВОСП или модернизацией существующих.

7.6. Поляризационная модовая дисперсия

Распространение линейно поляризованной световой волны вдоль одномодового оптического волокна можно представить как сумму двух поперечных ортогонально поляризованных волн (для фундаментальной моды одномодового волокна величина продольной компоненты поля значительно меньше поперечной компоненты). В идеальном, совершенно симметричном, волокне эти две ортогонально поляризованные волны (поляризационные моды) имеют одну и ту же постоянную распространения. Таким образом, хотя световая энергия в волокне распределена между двумя поляризационными модами, это не вызывает расширения светового импульса. В то же время реальное волокно не является совершенно симметричным, и две ортогонально поляризованные моды имеют неидентичные постоянные распространения. При этом каждая поляризационная мода, перемежаясь со своей скоростью, приводит к возникновению временной дисперсии и увеличению длительности импульса на выходе волокна. Это явление носит название поляризационной модовой дисперсии (ПМД). Задержка составляющих распространяющегося в волокне излучения за счет поляризационной модовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{\text{ПМД}} = k_{\text{ПМД}} \sqrt{L},$$

где $k_{\text{ПМД}}$ — коэффициент удельной поляризационной модовой дисперсии, который нормируется в расчете на 1 км, пс/км^{1/2}.

Поляризационная модовая дисперсия проявляется в одномодовых волокнах и обусловлена нециркулярностью (эллиптичностью) сердцевины и анизотропией, вызванной наведенными механическими напряжениями. При определенных условиях поляризационная модовая дисперсия становится соизмерима с хроматической дисперсией, поэтому результирующая дисперсия одномодового оптического волокна должна определяться в соответствии с выражением

$$\tau = \sqrt{(\tau_m^2 + \tau_v^2)} + \tau_{\text{ПМД}}^2.$$

Влияние поляризационной модовой дисперсии на искажение информационного сигнала в одномодовом волокне сходно с влиянием хроматической дисперсии, но есть и существенное различие. Так, хроматическая дисперсия представляет собой относительно стабильное явление, позволяющее определить ее влияние на систему передачи и, как следствие, она может быть скомпенсирована соответствующим расположением компенсаторов. В отличие от хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия на любой длине волны сигнала одномодового оптического волокна не является стабильной, что не позволяет осуществить пассивную компенсацию ее влияния.

Коэффициент ПМД в промышленных оптических кабелях, как правило, не превышает $0,5 \text{ пс/км}^{1/2}$, что ограничивает полосу передачи значением 40 ГГц на 100 км. Кабели, установленные несколько лет назад, использующие волокно со сплюсненной оболочкой, часто обладают более высоким ПМД, что делает проблематичным переход к более высоким битовым скоростям. Все это требует измерений ПМД при модернизации систем для более высоких скоростей передачи информации.

7.7. Измерение поляризационной модовой дисперсии

Одним из методов измерения поляризационной модовой дисперсии является метод сканирования длины волны. В данном методе статистически определяется среднее значение времени задержки между самой быстрой и самой медленной поляризационными модами, исходя из количества максимальных и минимальных значений мощности на выходе анализатора по мере сканирования длины волны. Вариант схемы измерения ПМД с использованием измерителя оптической мощности приведен на рис. 7.6.

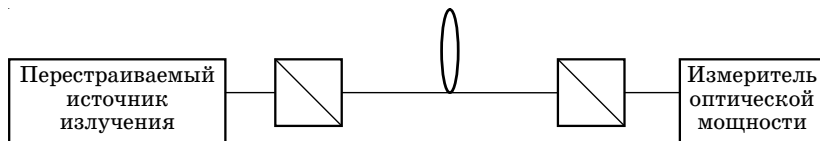


Рис. 7.6. Схема измерения поляризационной модовой дисперсии

Согласно данному методу результаты измерений накапливаются во время сканирования или пошаговых изменений длины волны источника излучения. Среднее значение времени задержки $\Delta\tau$ определяется в соответствии с выражением

$$(\Delta\tau)_\lambda = \frac{kN\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_1 - \lambda_2)},$$

где N — количество экстремальных значений (максимальных или минимальных); c — скорость света; k — безразмерный коэффициент, который называется коэффициентом взаимодействия мод и равен 0,824 для волокон с произвольной связью мод. Подстрочный индекс λ в $(\Delta\tau)$ указывает, что временная задержка определена для интервала длины волны.

Диапазон длин волн, в котором производятся измерения ПМД методом сканирования длины волны, должен быть достаточно большим, чтобы выдавать статистически значимое количество экстремумов.

8. Измерение коэффициента ошибок в цифровых волоконно-оптических системах передачи

8.1. Нормы на параметры ошибок систем передачи

Функционирование цифровых систем передачи (ЦСП) оценивается коэффициентом битовых ошибок (BER) — числом ошибок на заданное количество переданных битов информации. Определим причины появления битовых ошибок в реальных системах связи. Пусть P_1 и P_0 — оптическая мощность для переданного бита 1 и бита 0 соответственно. Фотоприемник в системе линии связи принимает решение, какой бит (0 или 1) был передан в каждом битовом интервале путем стробирования фототока. В цифровых трактах передачи действует ряд помех, влияющих на вероятность ошибок цифровой системы передачи. Во-первых, время передачи бита информации не остается постоянным (эффект фазового дрожания цифрового сигнала); во-вторых, излучаемая оптическая энергия не остается одной и той же при передаче как каждой единицы, так и каждого нуля вследствие шумов передатчика, приводящих к случайным изменениям амплитуды сигнала от импульса к импульсу; в-третьих, конечная длительность излучаемых импульсов и временная дисперсия в процессе их распространения приводят к тому, что часть энергии, относящаяся к периоду передачи определенного бита, поступает во время передачи соседних битов (межсимвольные помехи); в-четвертых, на величину фототока приемника влияют тепловые шумы самого приемника и т.п.

Из-за действия различного рода помех фототок для битов 1 и 0 является случайной величиной со средним значением фототока I_1 и I_0 . Можно считать, что под действием различных шумов разброс значений фототока приемника имеет нормальное распределение и дисперсию σ_1^2 и σ_0^2 для битов 1 и 0

соответственно. Функции плотности вероятности фототоков принятых сигналов приведены на рис. 8.1.

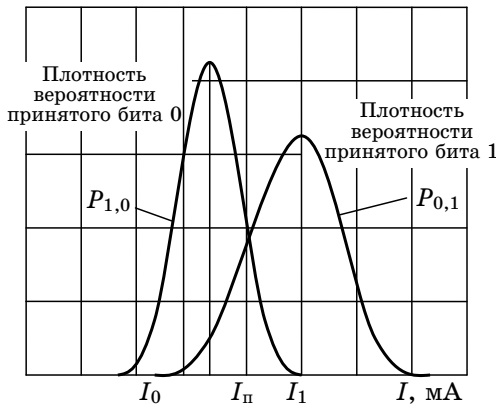


Рис. 8.1. Функция плотности вероятности фототока принятых сигналов

Приемник, отслеживая сигнал, должен решить, является ли переданный бит 0 или 1. При этом существует много возможных правил принятия решения, которые могут быть реализованы в приемнике с целью минимизации коэффициента битовых ошибок. Оптимальным решением является наиболее вероятное значение переданного бита, которое определяется путем сравнения текущего значения фототока с некоторым пороговым значением тока $I_{\text{п}}$. Например, при $I \geq I_{\text{п}}$ принимается решение, что был передан бит 1, в противном случае — бит 0. Геометрически $I_{\text{п}}$ представляет собой значение тока, для которого две кривые плотности вероятностей пересекаются (см. рис. 8.1).

Таким образом, появление ошибок является следствием совокупности всех текущих условий передачи цифровых сигналов, имеющих случайный характер, и они могут быть вычислены с определенной степенью достоверности только по результатам продолжительных измерений.

Значение коэффициента битовых ошибок BER в режиме счета ошибок определяется формулой

$$BER = \frac{N_{\text{ош}}}{T_{\text{изм}} B}, \quad (8.1)$$

где $N_{\text{ош}}$ — число ошибок, зафиксированное за время измерения; $T_{\text{изм}}$ — время измерения; B — скорость передачи цифровой последовательности сигнала.

Число ошибок $N_{\text{ош}}$, следовательно, и коэффициент ошибок BER являются случайными величинами, поэтому в приборах — измерителях коэффициента ошибок (ИКО) — измеряется среднее значение коэффициента ошибок за длительный интервал времени:

$$BER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{ош}i}}{T_{\text{изм}} B},$$

где n — число сеансов измерения; $N_{\text{ош}i}$ — число ошибок, зафиксированных в i -м сеансе.

Из приведенных выражений можно оценить требуемое время измерений:

$$T_{\text{изм}} = \frac{N_{\text{ош}}}{BER \cdot B}. \quad (8.2)$$

Например, при скорости передачи $B = 64$ кбит/с, числе ошибок $N_{\text{ош}} = 10$ для коэффициента ошибок $BER = 10^{-6}$ получим время измерения $T_{\text{изм}} \approx 2,5$ мин. При коэффициенте ошибок $BER = 10^{-9}$ время измерения будет составлять несколько секунд при больших скоростях передачи ($B = 155020$ кбит/с) и может достигать нескольких часов при скорости передачи $B = 64$ кбит/с. При проведении измерений коэффициента ошибок BER с усреднением время измерений умножается на степень усреднения n , которая может составлять величину от 10 до 100 в зависимости от требуемой точности измерений.

До недавнего времени критерием, с помощью которого оценивалось качество передачи цифровой сети, был средний коэффициент ошибок за длительный временной интервал. Этот критерий пригоден для систем, где имеют место случайные ошибки. Но в системах передачи большой емкости, применяющихся в магистральных сетях связи, мгновенно возникают пачки ошибок, которые при этом нельзя точно оценить, так как свойства ошибок изменяются во времени. Поэтому в качестве критерия оценки качества передачи в высокоскоростных сетях связи были определены следующие параметры ошибок [1]:

1) секунда с ошибками — односекундный интервал, содержащий хотя бы один ошибочный бит;

2) секунда, пораженная ошибками, — односекундные интервалы с коэффициентом ошибок $BER \geq 10^{-3}$.

Данные параметры ошибок оцениваются в течение времени готовности, отсчет которого начинается с первой секунды из 10 следующих друг за другом секунд, в каждой из которых $BER < 10^{-3}$. Критерием полного отказа цифровой системы передачи является промежуток времени, когда коэффициент ошибок в каждую секунду в течение 10 последовательных секунд более, чем 10^{-3} .

Рекомендации ИТУ-Т М.2100 регламентируют нормы качества на выраженные максимальным процентом времени параметры ошибок, которые зависят только от скорости передачи и приводятся для условного эталонного соединения длиной 27500 км. При этом нормы качества распределяются по участкам соединения соответствующей категории качества. В качестве эталонной модели такого участка принимается участок высокой категории качества протяженностью 25000 км, которому присваивается 40 % от общей нормы качества на параметры ошибок передачи «точка — точка», что в пересчете на 1 км дает 0,0016 %/км. Остальные 60 % нормы качества распределяются между четырьмя участками, расположенными по обе стороны от центрального. Поэтому распределение, пропорциональное длине L (км) тракта высокой категории качества, будет определяться как

$$AL = 0,0016 L, \text{ \%}/\text{км}. \quad (8.3)$$

Измерение коэффициента ошибок связано с обнаружением и счетом числа ошибок, а также измерением определенных временных интервалов. Для измерения коэффициента ошибок разработан ряд специальных приборов — анализаторов коэффициента ошибок. В зависимости от скорости передачи в контролируемом тракте в анализаторах коэффициента ошибок используются различные схемотехнические решения.

8.2. Анализаторы коэффициента ошибок

Рассмотрим принцип действия BER -анализаторов, основанных на методе обнаружения ошибок путем сравнения единичных элементов принимаемого псевдослучайного сигнала с переданным [7]. Используемый в телекоммуникациях анализатор

BER состоит из генератора тестовых кодов (рис. 8.2,*а*) и собственно анализатора ошибок (рис. 8.2,*б*).

Генератор тестовых кодов содержит генератор тактовых импульсов, который обеспечивает требуемую в ЦСП скорость передачи; генератор псевдослучайной бинарной последовательности (ПСП); кодер, осуществляющий кодирование сигнала ПСП в соответствии с кодом, используемым в ЦСП; устройство согласования с линией связи. В генераторе предусмотрен выход тактовой частоты для синхронизации работы анализатора ошибок.

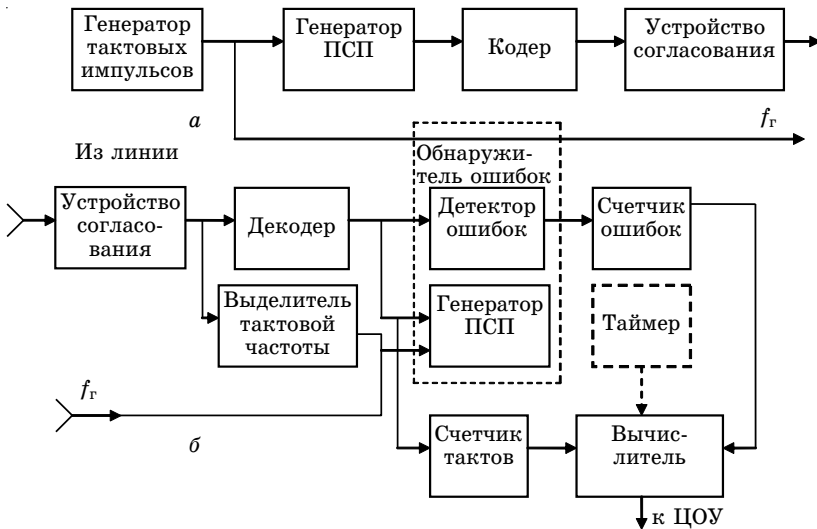


Рис. 8.2. Схема измерителя коэффициента ошибок:
a — генератор тестовых кодов; *б* — анализатор ошибок

Анализатор ошибок содержит: устройство согласования с линией связи; декодер, осуществляющий операцию обратного преобразования кодированного сигнала в исходный псевдослучайный сигнал; обнаружитель ошибок (показан пунктиром), включающий собственный генератор ПСП, идентичный генератору ПСП на передающем конце, детектор ошибок, который осуществляет обнаружение ошибки путем сравнения принятого сигнала и сигнала собственного генератора ПСП (например, путем посимвольного сравнения) и счетчик ошибок.

Кроме того, в анализатор ошибок входит выделитель тактовой частоты для осуществления тактовой синхронизации, когда генератор и анализатор разнесены в пространстве. Счетчик тактов подсчитывает число тактов, за которое осуществляется счет ошибок. Вычислитель производит вычисление коэффициента ошибок как отношения числа сосчитанных ошибок к числу сосчитанных тактов и подает его на цифровое отсчетное устройство. Показанный на схеме таймер позволяет измерять время счета ошибок (если есть таймер и известна скорость передачи, то можно обойтись и без счетчика тактов).

С помощью приведенной структурной схемы измеряется коэффициент ошибок в системах передачи с невысокой битовой скоростью (до 200 Мбит/с).

Схема высокоскоростного измерителя коэффициента ошибок приведена на рис. 8.3. Она предназначена для измерений в системах передачи с битовой скоростью до 3 Гбит/с [1, 2].

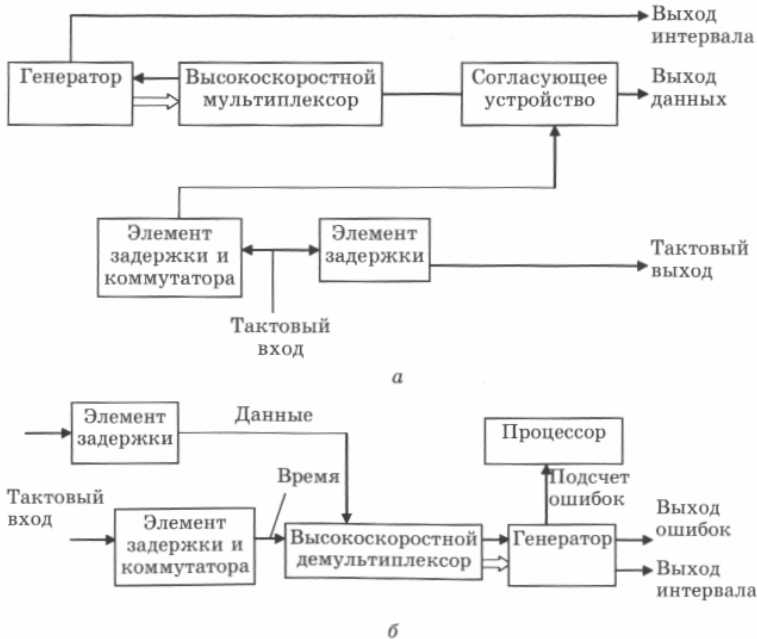


Рис. 8.3. Схема высокоскоростного измерителя коэффициента ошибок: а — генератор тестовых кодов; б — анализатор ошибок

Согласно схеме (рис. 8.3,а) тестовые коды генерируются как параллельные 16-битные кодовые группы при максимальной скорости 200 Мбит/с и передаются в регистраторы смещения и высокоемкую память. Вход синхросигнала генерируется синтезатором частоты. Согласующее устройство управляется через линию фиксированной задержки. Генератор тестовых кодов и выходной усилитель синхронизируются через схему дискретной и плавно изменяемой задержки.

В анализаторе ошибок (рис. 8.3,б) входы синхросигнала и данных проходят через схемы дискретной и плавной задержки, обеспечивая оптимальную настройку при обнаружении ошибок для любой фазы синхросигнала. Высокоскоростной демультиплексор преобразует последовательный поток данных в 16-битные параллельные кодовые группы наряду с поделенным на 16 синхросигналом. Параллельно соединенный генератор эталонных тестовых кодов синхронизируется с входными данными и осуществляет сравнение битов. Любая ошибка фиксируется одним из двух счетчиков, первый из которых подсчитывает число ошибок, а второй — общее число битов. Процессор обеспечивает анализ функционирования при наличии ошибок с разрешением до 1 мс.

Измерения коэффициента ошибок проводятся с помощью измерителей коэффициента ошибок (ИКО) в контрольных точках аппаратуры ВОСП.

8.3. Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок

Измерение энергетического потенциала линии связи. Энергетический потенциал представляет собой разность между измеренными уровнями средней мощности оптического излучения на выходе передающего и входе приемного устройств при вносимом затухании, обеспечивающем допустимое значение коэффициента ошибок. Поэтому измерение энергетического потенциала осуществляется путем изменения ослабления аттенюатора, включенного в линию связи, с одновременным контролем коэффициента ошибок. Применение калиброванного аттенюатора позволяет определить значение энергетического потенциала непосредственно по его показаниям и не требует дополнительных расчетов.

Измерение чувствительности приемного устройства.

Измерение проводят аналогично измерению энергетического потенциала, устанавливая калиброванный аттенюатор на входе приемного устройства и измеряя минимальное значение средней мощности оптического излучения, при котором коэффициент ошибок не превышает требуемого значения.

Измерение запаса мощности, обусловленной дисперсией волокна. Как известно, показатель преломления оптоволоконна изменяется в зависимости от длины волны, что является причиной хроматической дисперсии. Хроматическая дисперсия проявляется в неодинаковой скорости распространения света на разных длинах волн и, поскольку все лазеры имеют конечную ширину спектра излучения, приводит к увеличению длительности передаваемых импульсов. Следствием увеличения длительности оптических импульсов является уменьшение их мощности и межсимвольная интерференция. Таким образом, необходимо обеспечить запас мощности, минимальный уровень которой позволит передать сигнал вдоль всей длины волокна без ошибок.

Схема измерения запаса мощности вследствие хроматической дисперсии приведена на рис. 8.4.

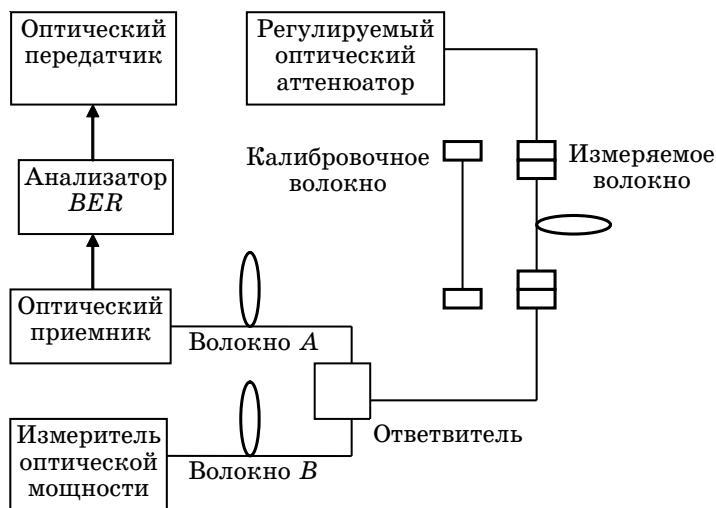


Рис. 8.4. Схема измерения запаса мощности, обусловленной хроматической дисперсией

Основные компоненты схемы — анализатор коэффициента ошибок, лазерный источник, регулируемый оптический аттенуатор, приемник оптического излучения и измеритель оптической мощности.

Генератор тестовых кодов анализатора *BER* создает тестовую последовательность, соответствующую скорости передачи данных в реальной системе.

При подключенном калибровочном волокне оптический аттенуатор настраивается на уровень, необходимый для достижения заданного *BER*, и затем определяется минимальное значение мощности P_1 , поступающей на приемник. Оптический аттенуатор должен обладать низким значением собственной хроматической дисперсии. Коэффициент деления оптического ответвителя должен составлять приблизительно 50:50. Затем подключается реальное волокно и определяется минимальный уровень оптической мощности P_2 при заданном *BER*. Необходимый запас оптической мощности P , обусловленной дисперсией, будет определяться разностью $P = P_2 - P_1$.

9. Измерение дрейфа и дрожания фазы

9.1. Общие положения

Фазовое дрожание (джиттер) определяется как кратковременное фазовое отклонение цифрового сигнала от его идеального состояния и является важным параметром, влияющим на вероятность ошибок цифровой системы передачи. При долговременном изменении фазы сигнала имеет смысл говорить о дрейфе фазы (вандере). Хотя не существует строго стандартизированной границы, отличающей джиттер от вандера, последний обычно рассматривают как фазовое отклонение с частотой ниже 10 Гц.

Возникновение фазового дрожания обусловлено тем, что хронизирующий сигнал (сигнал тактовой частоты) вырабатывается из входящего сигнала, и его параметры зависят от структуры сигнала, его искажений, шумов, помех, инструментальных погрешностей отдельных узлов линии. Это приводит к случайным изменениям периода хронизирующего сигнала около его номинального значения и соответственно к дрожанию передаваемого сигнала. На высокоскоростном осциллографе фазовое дрожание представляется в виде ряда смещенных синусоид, максимальный сдвиг которых определяет соответствующую фазовую флуктуацию.

Стандарты SONET и SDH регламентируют следующие параметры: генерируемое, или собственное, фазовое дрожание, вносимое дрожание фазы и устойчивость к дрожанию фазы.

Собственное фазовое дрожание имеет место на выходе оборудования при отсутствии приложенного входного фазового дрожания и может быть обнаружено в результате интегрированного измерения фазы и шума на оборудовании SONET/SDH.

Устойчивость к фазовому дрожанию определяет, насколько приемник способен восстанавливать исходный сигнал при наличии фазового дрожания, и определяется амплитудой поданного на вход оборудования фазомодулированного по

синусоидальному закону сигнала, который вызывает соответствующее увеличение ошибок.

В настоящее время определены нормы на максимальное значение дрейфа и дрожания фазы для иерархических стыков ЦСП. Предельные нормы определяются в виде максимальной ошибки временного интервала, выраженного полным размахом фазового дрожания, измеренного на выходе полосовых фильтров [1]. Нормы фазового дрожания должны соблюдаться при эксплуатации независимо от количества оборудования, включенного в тракт перед рассматриваемым стыком.

9.2. Измерение фазового дрожания цифровым осциллографом

Собственное фазовое дрожание данных и тактовых импульсов может быть измерено непосредственно с помощью высокоскоростного цифрового осциллографа (рис. 9.1).

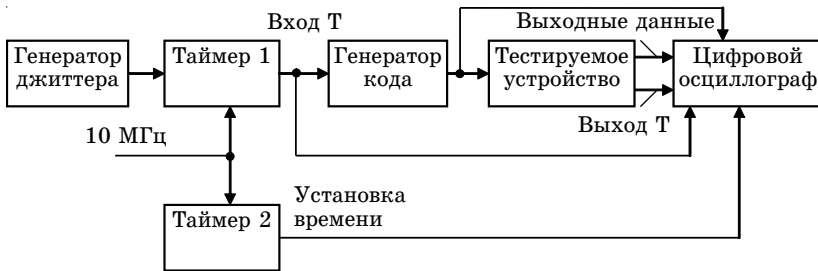


Рис. 9.1. Измерение фазового дрожания цифровым осциллографом

Независимый от фазового дрожания сигнал запуска развертки осциллографа обеспечивается источником тактового сигнала (таймер 2), частота которого зафиксирована на уровне источника тактового сигнала (таймер 1). Таймер 1, возбуждаемый генератором фазового дрожания, управляет генератором тестовых кодов, который подает данные, подверженные фазовому дрожанию, на тестируемое устройство для измерения преобразования фазового дрожания. Анализ входного и выходного сигналов с использованием встроенных гистограммных функций осциллографа позволяет измерить максимальную амплитуду фазового дрожания.

Необходимо отметить, что из-за высокого уровня собственных шумов, вызванных использованием широкой полосы частот, этот метод обладает низкой чувствительностью. Другим недостатком метода является необходимость использования дополнительного источника тактовых сигналов для создания сигнала запуска осциллографа.

9.3. Измерение фазового дрожания фазовым детектором

В методе с использованием фазового детектора сравнивается фаза восстановленного тактового сигнала тестируемого устройства или оборудования со свободным от фазового дрожания источником тактового сигнала (рис. 9.2).

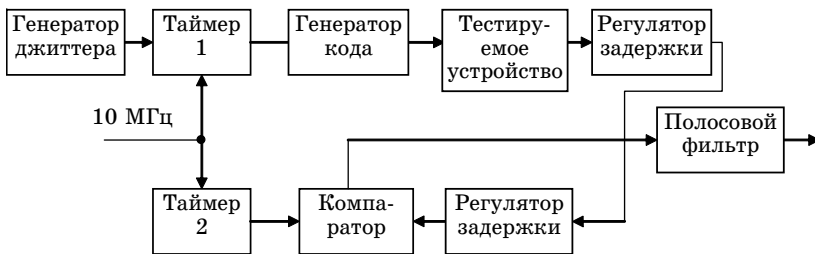


Рис. 9.2. Измерение фазового дрожания фазовым детектором

Исследуемый сигнал через тестируемое устройство поступает на фазовый детектор. Опорный сигнал тактовой частоты поступает на фазовый детектор через регулируемую линию задержки. На выходе фазового детектора получаем импульсную последовательность с длительностью импульсов, пропорциональной фазовому сдвигу обоих сигналов. Ограничитель стабилизирует амплитуду импульсов. Фильтр нижних частот выделяет постоянную составляющую, она измеряется вольтметром постоянного тока, показания которого пропорциональны среднему значению модуля случайной величины фазового дрожания. Вместо вольтметра может быть использован цифровой измеритель временных интервалов (цифровой измеритель фазы). Устройство регулирования задержки позволяет компенсировать постоянную составляющую фазового дрожания. Критерием является минимум показаний вольтметра при

настройке прибора. Таким образом, в устройстве сравнивается фаза восстановленного из тестируемого устройства тактового сигнала и фаза свободного от фазового дрожания источника тактового сигнала.

Метод создает основу для множества устройств измерения фазового дрожания и обеспечивает быстрое измерение фазового дрожания. К недостаткам метода следует отнести необходимость использования дополнительного источника тактовых сигналов в качестве образцовых для фазового детектора. Кроме того, система измерений фазового дрожания, использующая фазовый детектор, обычно состоит из специализированного устройства, работающего только на определенной скорости передачи данных.

9.4. Тестирование допустимого фазового дрожания

Устойчивость аппаратуры к фазовому дрожанию определяется тем, насколько приемник способен восстанавливать сигнал при наличии фазового дрожания. Допустимое фазовое дрожание определяется как амплитуда синусоидального фазового дрожания, которое при подаче на вход тракта или аппаратуры вызывает заданное ухудшение коэффициента ошибок. Допустимое отклонение фазового дрожания зависит от амплитуды и частоты поданного фазового дрожания, а нормированное ухудшение показателя ошибок может выражаться либо увеличением *BER*, либо моментом времени появления ошибок. Первый метод (по критерию увеличения *BER*) позволяет определить воздействие фазового дрожания на способность системы точно восстанавливать хронизирующий сигнал из информационного потока с фазовым дрожанием и другими факторами ухудшения качества передачи. Вторым методом (по критерию появления ошибок) рекомендуется использовать в тех случаях, когда необходимо выдерживать динамически меняющуюся скорость входного цифрового информационного сигнала, например при выходе из синхронизма в асинхронной цифровой аппаратуре группообразования.

Тестирование фазового дрожания по критерию увеличения коэффициента ошибок. Критерием увеличения коэффициента ошибок для измерения допустимого фазового дрожания на заданной частоте является амплитуда синусоидального

фазового дрожания, удваивающего коэффициент ошибок. Схема тестирования фазового дрожания по критерию увеличения коэффициента ошибок приведена на рис. 9.3.

Процедура тестирования делится на два этапа.

1. В эталонных точках измеряемого объекта определяются два значения коэффициента ошибок. Для этого при нулевом фазовом дрожании к сигналу добавляется шум до тех пор, пока коэффициент ошибок не станет равным первоначальному. Затем шум снижается до того момента, когда коэффициент ошибок уменьшится в два раза.

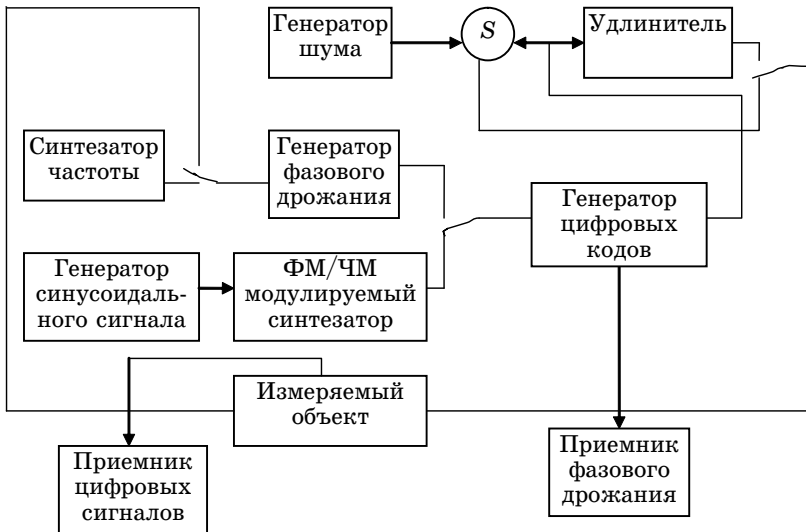


Рис. 9.3. Схема измерения фазового дрожания по критерию увеличения коэффициента ошибок

2. На определенной частоте в испытуемый сигнал вводит фазовое дрожание, значение которого увеличивается до получения первоначального коэффициента ошибок. Тем самым воспроизводится мера допустимого фазового дрожания. Измерение повторяется на различных частотах фазового дрожания, чтобы результат измерения соответствовал допуску синусоидального входного фазового дрожания для испытываемого объекта в требуемом диапазоне частот.

Тестирование фазового дрожания по критерию появления ошибок. Критерий появления ошибок для измерения

допустимого значения фазового дрожания определяется на заданной частоте как наибольшая амплитуда фазового дрожания, при увеличении которой в последовательных 30-секундных интервалах измерений имеют место не более двух секунд с ошибками. Схема измерения фазового дрожания по критерию появления ошибок приведена на рис. 9.4.

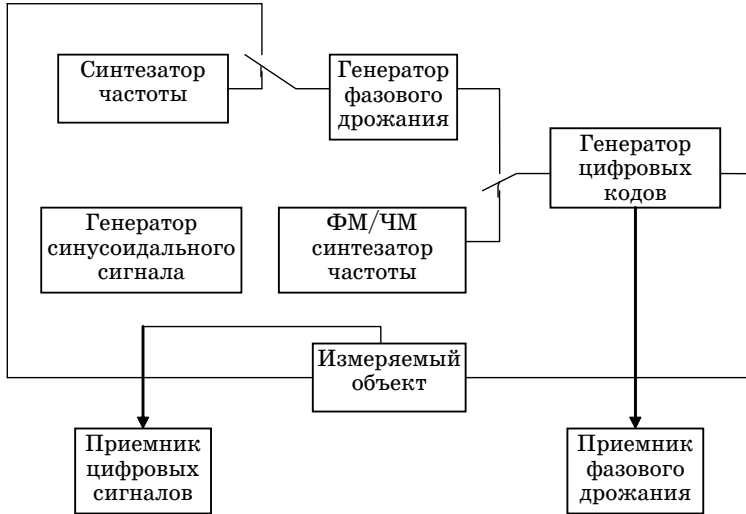


Рис. 9.4. Схема измерения фазового дрожания по критерию появления ошибок

Процедура тестирования заключается в регулировке частоты фазового дрожания испытываемого сигнала, обеспечивающего тот или иной критерий появления ошибок, и состоит из следующих этапов:

- 1) исключение амплитуды фазового дрожания, при которой прекращается безошибочная работа измеряемого объекта;
- 2) измерение отдельных секунд с ошибками в течение 30 с при каждом увеличении амплитуды фазового дрожания, начиная с области, установленной в п. 1;
- 3) определение наибольшей амплитуды фазового дрожания, при которой общее число секунд с ошибками не превышает двух.

Процесс повторяется для такого количества частот, при котором результат измерения будет точно отражать допустимое входное синусоидальное фазовое дрожание в необходимом диапазоне частот.

10. Методы и средства волоконно-оптической рефлектометрии

10.1. Метод обратного рассеяния

Для обеспечения эффективной работы ВОСП очень важным является быстрое установление и устранение обрыва волокна. Обрыв в канале с высокой информационной емкостью может привести к закрытию большого количества коммуникационных каналов. Не менее важен и вопрос определения ослабления оптического кабеля, а также потерь, вносимых коннекторами и другими компонентами при настройке и эксплуатации ВОСП.

В основе решения этих задач лежит рефлектометрия — метод измерения параметров ВОСП, основанный на реакции линии связи на зондирующее оптическое излучение. Реакция оптического волокна на зондирующий световой импульс может проявляться в виде потока обратного излучения, обусловленного эффектами френелевского отражения (когда размер неоднородностей много больше длины волны) или рэлеевского рассеяния (когда размер неоднородностей сравним или меньше длины волны, рис. 10.1).

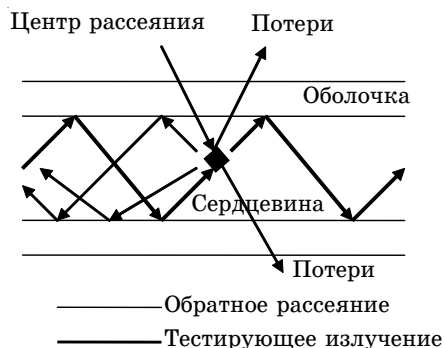


Рис. 10.1. Распространение светового излучения в оптическом волокне

Наиболее перспективным и разработанным методом импульсной рефлектометрии является метод, основанный на измерении мощности обратного рэлеевского рассеяния (OTDR-метод). Принцип измерений основан на введении в волокно импульса оптического излучения и последующем анализе той малой части светового потока, которая возвращается на вход волокна в результате обратного рэлеевского рассеяния и френелевских отражений. В результате математической обработки сигнала фотоприемника на экране рефлектометра формируется изображение, которое называется рефлектограммой. Рефлектограмма представляет зависимость уровня сигнала от расстояния вдоль волокна и позволяет определить затухание и разрыв волокна, вносимые потери компонентов, наличие механических воздействий на волокно, а также другие важные характеристики линии связи. Типичная рефлектограмма волоконно-оптической линии связи приведена на рис. 10.2.

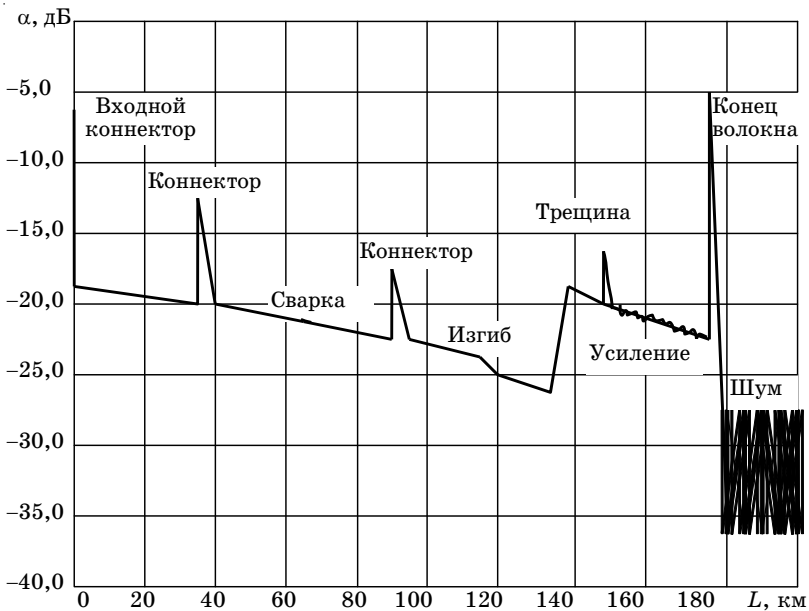


Рис. 10.2. Типовая рефлектограмма волоконно-оптической линии связи

Рассмотрим теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.

Пусть на вход оптического волокна в момент t_0 подается световой импульс прямоугольной формы, длительностью Δt и энергией E_0 . Пусть световая энергия, дошедшая до точки x , равна $E(x)$ (рис. 10.3).

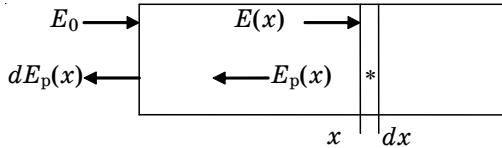


Рис. 10.3. Прямая и обратная световые волны в оптическом волокне

Будем считать, что на участке длиной dx энергия светового импульса $E(x)$ меняется незначительно. Тогда энергию, рассеянную назад участком dx волокна, можно записать следующим образом:

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) dx, \quad (10.1)$$

где α_p — эффективный коэффициент рассеяния, который учитывает рэлеевское рассеяние, определяемое рабочей длиной волны света, локальными неоднородностями (примесями, наличием микроизгибов) и дефектами волокна; $S(x)$ — фактор обратного рассеяния, определяющий, какая часть общей рассеянной мощности захватывается апертурой волокна и распространяется по нему в обратном направлении. Фактор обратного рассеяния $S(x)$ определяется выражением

$$S(x) = \left(\frac{NA}{n_0} \right)^2 \frac{1}{q}, \quad (10.2)$$

где n_0 — показатель преломления на оси сердцевины волокна; q — параметр, определяющий профиль показателя преломления волокна, типовое значение которого для одномодового волокна равно 4,55.

Энергия $E(x)$ связана с входной энергией соотношением

$$E(x) = E_0 e^{-\alpha^+(x)x}, \quad (10.3)$$

где $\alpha^+(x)$ — среднее значение коэффициента затухания световой волны при прямом распространении света на участке $(0, x)$.

Энергия, поступившая на вход волокна за счет обратного рассеяния от участка dl , составляет

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) e^{-[\alpha^+(x) + \alpha^-(x)]x} dx, \quad (10.4)$$

где $\alpha^-(x)$ — среднее значение коэффициента затухания на участке $(x, 0)$.

Коэффициенты $\alpha^+(x)$ и $\alpha^-(x)$ определяются по формуле

$$\alpha^\pm(x) = \frac{1}{x} \int_0^x \alpha_{\text{тек}}^\pm(x) dx, \quad (10.5)$$

где $\alpha_{\text{тек}}^\pm$ — текущее значение коэффициента затухания волокна, зависящее от модового состава излучения для многомодовых волокон, и в общем случае $\alpha_{\text{тек}}^+ \neq \alpha_{\text{тек}}^-$.

В случае симметричного оптического волокна $\alpha_{\text{тек}}^+ = \alpha_{\text{тек}}^-$, и уравнение (10.4) примет вид

$$dE_p(x) = E_0 \alpha_p(x) S(x) e^{-2\alpha(x)x} dx. \quad (10.6)$$

Здесь мы считаем, что $\alpha = \alpha^+ = \alpha^-$ — среднее значение коэффициента затухания при распространении прямой и обратной волны.

Формула (10.6) связывает интенсивность обратно рассеянного излучения, пришедшего на вход волокна, с параметрами волокна. Однако экспериментально определяется временная форма обратно рассеянного сигнала, поэтому необходимо установить связь между пространственной координатой x и временной t . Это задача о распространении светового импульса в неоднородном световоде, и при строгом подходе ее решение сложно. Задачу можно упростить, если сделать следующие предположения:

1) световой импульс движется по волокну со средней групповой скоростью $V_{\text{гр}}$;

2) за величину уширения оптического импульса примем среднеквадратичное уширение $\Delta\tau(x)$ при распространении по волокну на расстояние x и будем считать, что $\Delta\tau(x) \ll \Delta t$, где Δt — длительность импульса на входе в волокно по уровню 0,5 максимальной интенсивности.

Тогда, переходя от переменных E и x к мощности P и времени t , т.е. учитывая, что

$$E_0 = P_0 \Delta t, \quad 2x = V_{\text{гр}} t, \quad dx = \frac{1}{2} V_{\text{гр}} dt,$$

уравнение мощности обратно рассеянной световой волны запишем в виде

$$P_p(t) = 0,5 P_0 \Delta t S \alpha_p V_{\text{гр}} e^{-\alpha V_{\text{гр}} t}, \quad (10.7)$$

где P_0 — значение мощности оптического излучения на входе в волокно.

Запишем последнюю формулу через расстояние:

$$P_p(x) = 0,5 P_0 \Delta t S \alpha_p V_{\text{гр}} e^{-2\alpha x}. \quad (10.8)$$

Из этих уравнений следует, что мощность обратно рассеянного сигнала зависит от входной мощности P_0 , длительности Δt импульса оптического излучения, параметров S и α оптического волокна, а также от среднего коэффициента затухания и групповой скорости.

Две последние формулы являются основными в методе импульсной рефлектометрии. Они позволяют по величине сигнала обратного рассеяния $P_p(t)$ изучать распределение параметров волокна по его длине.

При резком изменении показателя преломления сердцевины волокна имеет место френелевское отражение. Законы френелевского отражения хорошо изучены и многократно описаны в литературе. Отражение Френеля определяется коэффициентом

$$R = \frac{P_{\text{отр}}}{P_0},$$

где $P_{\text{отр}}$, P_0 — величина мощности отраженного и падающего сигналов соответственно.

В этом случае в сигнале обратного рассеяния получим локальный пик (см. рис. 10.2). Как правило, первый пик резкого изменения показателя преломления имеет место на входном участке при вводе излучения в волокно. Определим отношение мощностей обратно рассеянного сигнала и сигнала, отраженного от торцевой поверхности в начале волокна. Пусть импульсный источник оптического излучения мощностью P_0 и длительностью $\Delta t = 100$ нс воздействует на волокно со следующими типовыми параметрами: $S = 3,8 \cdot 10^{-3}$, $V_{\text{гр}} = 2,85 \cdot 10^8$ м/с, $\alpha = \alpha_p = 2,5$ дБ/км. Тогда отношение

мощностей френелевского отражения $P_{\text{фр}}$ и релеевского рассеяния $P_{\text{р}}$ составит

$$\frac{P_{\text{фр}}}{P_{\text{р}}} = \frac{R^2}{0,5\Delta t\alpha SV_{\text{гр}}} = 1,7 \cdot 10^3.$$

Таким образом, разность в уровне мощностей $P_{\text{фр}}$ и $P_{\text{р}}$ составляет 32 дБ, а мощность излучения $P_{\text{р}}$, отраженная от неоднородности волокна, составляет приблизительно 1/100 000 от мощности P_0 падающего в прямом направлении излучения, что требует очень чувствительных методов ее обнаружения.

Отраженный от входа волокна сигнал, как правило, перегружает приемник, а на его восстановление требуется время. Этот интервал времени, при котором рефлектометр нечувствителен к другим сигналам отражения, называется «мертвой зоной». «Мертвая зона» в основном зависит от длительности импульса светового излучения, проходящего по волокну. Чем больше длительность импульса в секундах, тем больше «мертвая зона» в метрах. «Мертвые зоны» могут возникнуть и при отражении сигналов от элементов линии связи (например, коннекторов) с высокой отражательной способностью.

10.2. Устройство

и основные характеристики рефлектометров

Обобщенная схема типового рефлектометра (рис. 10.4) содержит источник оптического излучения, фотоприемник, волоконно-оптический направленный ответвитель с оптическим соединителем, блок управления, а также устройство обработки информационного сигнала и отображения результатов измерений. Вертикальная ось последнего градуируется в децибелах, а положение луча по горизонтальной оси изменяется в зависимости от времени запаздывания оптического сигнала при его распространении по волокну. Горизонтальная ось градуируется в единицах длины конкретного типа волокна, определяемого его коэффициентом преломления. Блок управления предназначен для синхронизации работы источника оптического излучения и устройства отображения. Устройство обработки информационного сигнала осуществляет регистрацию

и занесение в память временных характеристик мощности обратного рассеяния и их преобразование для соответствующего представления устройством отображения.

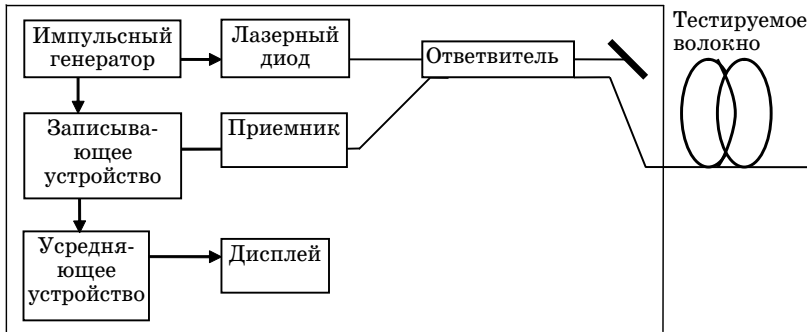


Рис. 10.4. Структурная схема рефлектометра

Современные рефлектометры включают базовый и ряд сменных блоков, которые отличаются рабочей длиной волны и динамическим диапазоном. Кроме того, рефлектометр может быть объединен с принтером, а также блоком дистанционного управления и коммутатором оптических волокон, что позволяет использовать его в качестве устройства удаленного оптического тестирования.

Основными характеристиками рефлектометров, позволяющими сравнивать их между собой, являются динамический диапазон, диапазон измерения, мертвая зона, разрешающая способность.

Динамический диапазон — основной параметр, представляющий интерес для пользователя, поскольку именно он определяет максимальную длину контролируемого прибором волокна. Наиболее надежный способ сравнения различных рефлектометров заключается в определении динамического диапазона в децибелах в виде отношения максимальной излучаемой мощности P_0 к минимальной регистрируемой мощности P_{\min} :

$$D = 10 \lg (P_0 / P_{\min}).$$

В современных рефлектометрах динамический диапазон достигает 40 дБ. Трудность в достижении более широкого динамического диапазона связана с методикой измерений.

Волокно вносит потери, которые возрастают с увеличением его длины, и в конечном счете световой поток, возвращаемый к фотоприемнику, становится настолько малым, что его невозможно уверенно регистрировать. Максимальное расстояние, с которым мог бы работать рефлектометр с динамическим диапазоном 40 дБ, составляет 200÷240 км. Длину в 300 км может обеспечить прибор с $D = 46$ дБ.

На практике динамический диапазон определяют как выраженную в децибелах разницу между начальным уровнем обратного рассеяния и уровнем шума по истечении 3 мин одностороннего измерения потерь волокна. Это значение динамического диапазона часто указывается в литературе.

Диапазон измерения рефлектометра определяется как максимальное ослабление, которое прибор в состоянии измерить. В качестве события, которое должно быть идентифицировано, обычно выбирают сращивание волокон, создающее потери порядка 0,5 дБ.

Пространственная разрешающая способность рефлектометра Δl характеризует способность прибора обнаружить два соседних события и определяет возможность выделения близко расположенных неоднородностей. Разрешающая способность Δl зависит от длительности импульса Δt , излучаемого лазером, ширины полосы пропускания усилителя Δf и определяется выражением

$$\Delta l = \frac{c}{2n} \sqrt{\Delta t^2 + \left(\frac{1}{\Delta f}\right)^2}.$$

Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшать длительность зондирующих импульсов и расширять полосу пропускания усилителя.

Увеличение длительности оптических импульсов или расширение полосы пропускания усилителя приводит к увеличению дальности обнаружения неоднородности l , но одновременно снижает пространственную разрешающую способность Δl . Таким образом, всегда должен быть компромисс между дальностью и пространственной разрешающей способностью. Он достигается снижением динамического диапазона на малых расстояниях тестирования, что позволяет расширить полосу пропускания усилителя и тем самым повысить разрешающую способность и точность измерения расстояния, а на

больших расстояниях тестирования используется меньшая полоса пропускания.

На практике находят применение одномодовые и многомодовые рефлектометры, которые работают во всех основных окнах прозрачности волоконных световодов. Современные рефлектометры выполнены в виде стационарного прибора размером с профессиональный осциллограф (рефлектометры дальнего действия) или как портативный мини-рефлектометр. Последние хорошо зарекомендовали себя на кабельных трассах длиной в несколько десятков километров.

Мини-рефлектометры реализуют основные функции метода обратного рассеяния и позволяют:

- 1) измерять общую длину линии и расстояние до отдельных неоднородностей;
- 2) оценивать общее затухание трассы и отдельных ее участков, а также потери на неоднородностях;
- 3) представлять результаты измерения в графическом и табличном видах, записывать их в память.

Перед проведением измерений оператор может установить длительность зондирующего импульса, время накопления результатов, величину порога регистрируемых неоднородностей.

Рефлектометр имеет функцию лупы и может исследовать отдельные участки трассы с увеличенным разрешением.

Мини-рефлектометры первого поколения обычно выпускались в виде законченных приборов. В современных конструкциях наметилась тенденция к модульным решениям. Сменные блоки позволяют производить измерения на длинах волн $\lambda = 0,850; 1,3; 1,55$ мкм. В таких рефлектометрах предусмотрен встроенный принтер, дисковод для записи результатов измерений на дискеты.

Классический рефлектометр, даже в варианте мини-рефлектометра, является сложным и дорогим прибором. За счет этого он малодоступен для средних и мелких фирм, занимающихся ВОСП.

Поэтому появились упрощенные модели зондирующих оптических приборов, которые называются оптическими локаторами. Принцип их действия основан на методе обратного рассеяния, а упрощение достигнуто главным образом за счет отказа от использования графического дисплея и применения

более простого программного обеспечения для построения рефлектограмм. Это позволяет на 10–50 % снизить стоимость локатора по сравнению с обычными рефлектометрами. Например в измерителе типа Photodyne серии 5200 американской фирмы ЗМ графический дисплей заменен на простой алфавитно-цифровой, куда последовательно выводится расстояние до дефекта и величина затухания сигнала на этом дефекте. Дальность действия такого локатора достигает 80 км. В измерителях длины оптической линии типа Fiber Ranger американской компании Rifoc за счет уменьшения дальности действия до 5 км значительно снижен вес локатора. Эти измерители последовательно выводят на экран расстояние до неоднородности. При наличии у пользователя ПК, на котором установлено соответствующее программное обеспечение, на экране монитора может быть воспроизведена полная рефлектограмма исследуемой линии связи.

Одно из направлений развития современной рефлектометрии — реализация прибора в виде стандартной карты (платы) ПК, что позволяет использовать вычислительные мощности компьютера для управления процессом измерений и обработки результатов измерений. Плата вставляется в ПК и несет на себе электронные компоненты формирования зондирующего импульса, приема отраженного сигнала, его преобразования в электрический сигнал. Процедуры дальнейшей обработки и формирования рефлектограммы выполняет процессор компьютера при соответствующем программном обеспечении. Одним из примеров такого решения являются карты рефлектометров FCS 100/400 фирмы EXPO, которые специально разработаны ПК со стандартным или специальным прикладным программным обеспечением.

11. Контроль волоконно-оптических сетей связи

Интенсивное развитие современных сетей телекоммуникаций выдвигает на первый план задачу обеспечения их безотказной работы. Существует ряд причин ухудшения или прерывания связи по ВОСП. Одной из основных причин прерывания связи являются обрывы волокна. Поиск и локализация этой неисправности связаны с потерей времени и необходимостью проведения измерений на месте повреждения. Это, в свою очередь, требует увеличения числа бригад по обслуживанию кабельного хозяйства. Помимо данного вида неисправностей в линиях связи имеют место нарушения, вызванные изменением параметров оптических кабелей. Так, например, намокание кабеля, механические напряжения, вызванные его провисанием, приводят к временным изменениям параметров волокна, следствием чего является непредвиденное изменение качества связи. Старение кабеля также ведет к ухудшению качества связи. Необратимые процессы деградации волокна определить достаточно сложно. Для этого необходимо располагать статистическими данными, требующими большого числа измерений. Проведение таких измерений в полевых условиях не обеспечивает необходимой точности и связано со значительными трудовыми и временными затратами.

Наряду с вышеизложенным, интенсивное развитие современных сетей телекоммуникаций приводит к периодически возникающим требованиям увеличения пропускной способности каналов связи, а также числа и качества услуг. Решение данной задачи невозможно без наличия информации о значениях потерь и отражений в любой точке оптической сети, а также энергетическом бюджете ее участков.

Все эти проблемы требуют оперативного контроля и диагностики состояния сети связи в процессе эксплуатации. Наиболее эффективно перечисленные задачи могут быть решены

с помощью систем удаленного контроля (Remote Fiber Test System — RFTS) [8]. В основе действия этих систем лежит использование оптических рефлектометров, которые обеспечивают измерение потерь, ослабления и отражений с одного конца оптического волокна. Доступ к тестируемым оптическим волокнам обеспечивают оптические переключатели, управлять которыми можно дистанционно. При размещении переключателей в узлах дерева сети одно устройство удаленного тестирования может обеспечить мониторинг более 5000 кабелей.

Контроль оптических кабелей может быть проведен как по пассивному, так и по активному волокну [8]. Контроль по пассивному оптическому волокну основан на тестировании резервного волокна оптического кабеля (ОК) на длине волны, независимой от оптического луча трафика (рис. 11.1).

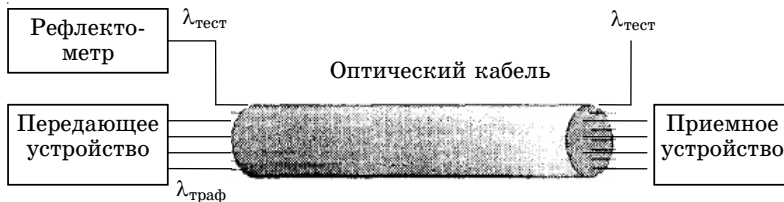


Рис. 11.1. Метод контроля оптического кабеля по пассивному волокну

Применение этого метода просто в реализации, не требует дополнительного оптического оборудования, но обуславливает необходимость дополнительного дублирующего волокна, которое отражает свойства волокон кабеля.

Обычно в ВОЛС применяется оптическое излучение с длинами волн $\lambda = 1310$ нм и $\lambda = 1550$ нм. Для контроля по активному волокну целесообразно использовать $\lambda = 1550$ нм при передаче данных на длине волны $\lambda = 1310$ нм и наоборот. В то же время для увеличения емкости каналов передачи данных часто используют обе длины волн. Поэтому для контроля в активной линии связи необходимо использовать длину волны, отличную от указанных длин волн (рис. 11.2). Как правило, используется длина волны $\lambda = 1625$ нм, которая отличается от используемых для передачи данных и может быть эффективно выделена на приемной стороне линии связи. Для этого в

ВОЛС вводят мультиплексоры M , объединяющие длину волны тестирования с длиной волны трафика. Для исключения взаимного влияния двух процессов — передачи данных и контроля волокна — в схему вводят фильтры Φ , которые предотвращают попадание тестируемого излучения на вход сетевого оборудования, а излучения передачи данных — на вход рефлектометра. Применение длин волн $\lambda = 1310, 1550$ и 1625 нм вызвано тем, что в этом случае оптические компоненты, используемые в волоконно-оптической технике, имеют наиболее низкие потери.

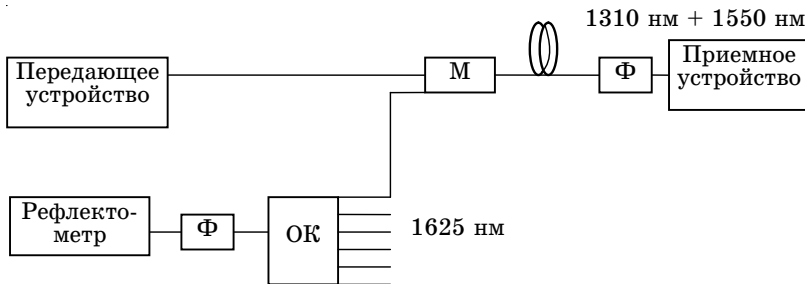


Рис. 11.2. Метод контроля оптического кабеля по активному волокну

При наличии в ВОЛС регенерационных участков, а также при необходимости исключения телекоммуникационного оборудования (ТО) на этапе контроля предусматривается обход этих участков (рис. 11.3).

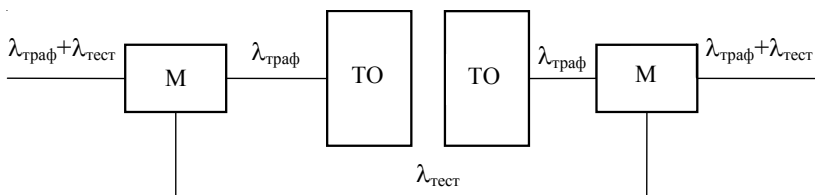


Рис. 11.3. Схема организации обхода телекоммуникационного оборудования по активному волокну

Метод контроля по активному ОВ дает 100-процентную гарантию обнаружения неисправностей, но отличается от предыдущего более высокой стоимостью из-за необходимости использования мультиплексоров и фильтров. Этот метод

целесообразно применять для тестирования ответственных волокон, когда все волокна кабеля заняты для передачи данных.

Развитие телекоммуникационных технологий, использующих ВОЛС в глобальных сетях передачи данных и в телефонных сетях общего пользования, требует их централизованного контроля. Наиболее эффективно эта задача может быть решена с помощью систем удаленного контроля. К настоящему времени разработаны система контроля и диагностики ВОЛС Orion, система контроля качества сети NQMS, система контроля качества передачи данных Fast Net, в качестве менеджера — система Operator, позволяющая интегрировать все вышеперечисленные системы в единую систему контроля и диагностики. Построение интегрированной системы контроля обеспечит наибольшие возможности при сквозном контроле интегрированных систем, использующих различные методы и средства передачи.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Портнов Э. Л. Оптические кабели связи их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов.- Горячая линия-Телеком , 2012. -448 с.
2. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- СПб.: Лань, 2010- 267 с.
3. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. 3-е изд., перераб. и доп. -М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
4. Портнов Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 544 с.;
4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
5. Горлов Н.И., Богачков И.В. Волоконно-оптические линии передачи. Методы и средства измерений параметров: монография. – М: «Радиотехника», 2009. – 192 с.
6. Богачков И.В., Горлов Н.И. Измерение характеристик волоконно-оптических линий связи с помощью импульсно-рефлектометрических методов: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 188 с.
7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи.- 4-е изд. доп.-М: Техносфера, 2007.-512 с.
8. Голубь Б.И., А. Ф. Котюк А.Ф., Кузин А. Ю. Основы обеспечения единства оптико-физических измерений.- М.:Горячая Линия - Телеком, 2006.- 151 с.
9. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с,
10. Горлов Н.И., Минина Е.А. Методы и аппаратура измерения параметров систем и устройств связи оптического диапазона. Учебное пособие для ВУЗов. Н-ск:СибГУТИ, 2005.-311 с.
11. Иванов А.Б. Контроль соответствия и качества в телекоммуникациях и связи. Часть 1. -М.: Сайрус Системс, 2001. -377 с.
12. Иванов А.Б., Засецкий А.В., Постников С.Д., Соколов И.В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Ч.2.- М.: Сайрус Системс, 2001. - 334 с.
13. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи. М: Эко-Тренз, 2001 г.-268с.
14. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи. М: Эко-Тренз, 1999 г.-196с.
15. Иванов А.Б. Волоконная оптика (Компоненты, системы передачи, измерения).- М:Сайрус Системс, 1999 г.-672с.
16. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М: Эко-Тренз, 1998 г.- 270с.

17. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для ВУЗов / В.А.Андреев, В.А.Бурдин, Б.В.Попова - М: Радио и связь,1995 г.-200с.
18. ГОСТ Р МЭК 793-1-93. Волокна оптические. Общие технические требования. Издательство стандартов, 1994 г.
17. Бутусов М. М., Верник С. М. и др.: Волоконно-оптические системы передачи. Учебное пособие для ВУЗов. М: Радио и связь, 1992 г.
18. Метрологическое обеспечение систем передачи: Учебное пособие для ВУЗов/ Б.П.Хромой, А.Л. Сенявский и др. под редакцией Б.П.Хромого. М: Радио и связь,1991 г.-392с.
19. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем / Под ред.А.Ф.Котюка.-М: Радио и связь, 1987г.-224с.

Учебное издание

А.Е. Мандель

**Методы и средства измерения в
волоконно-оптических системах связи**

Учебное пособие

по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах» для направления подготовки Телекоммуникации – 210400, специальность 210401 – Физика и техника оптической связи»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л..

Тираж экз. Заказ

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.