

В.Е. Митрохин

ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Учебник пособие

В.Е. Митрохин

ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

*Рекомендовано
Управлением учебных заведений
и правового обеспечения Федерального агентства железнодорожно-
го транспорта в качестве учебного пособия
для студентов вузов железнодорожного транспорта*

Москва
2007

УДК 656.254.7(07)
ББК 39.275
М67

Рецензенты: зав. кафедрой «Электрическая связь» ПГУПС, канд. техн. наук, проф. *В.А. Кудряшов*; ведущий научный сотрудник ВНИИАС, канд. техн. наук *Э.Е. Асс*

Митрохин В.Е.

М67 Измерения в волоконно-оптических системах передачи: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. — 197 с.
ISBN 978-5-89035-473-0

В пособии приведены основные параметры оптических волокон и методы измерений в волоконно-оптических системах передачи. Изложены принципы эксплуатационных измерений в волоконно-оптических системах связи. Даны технические характеристики, принципы работы и программное обеспечение оптических тестеров и рефлектометров. Описана система автоматизированного мониторинга волоконно-оптических кабелей.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов железнодорожного транспорта, обучающихся по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», а также может быть использовано для специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и полезно инженерно-техническим работникам по эксплуатации оптических систем передачи на железнодорожном транспорте.

УДК 656.254.7(07)
ББК 39.275

ISBN 978-5-89035-473-0

© Митрохин В.Е., 2007
© ГОУ «Учебно-методический центр
по образованию на железнодорожном
транспорте», 2007

Введение

Согласно статистике объем передаваемой в мире информации и услуг, оказываемых связью, увеличивается по экспоненциальному закону, но реальный спрос постоянно превышает прогнозируемый. Очевидно, что сложившаяся ситуация стимулирует исследования по совершенствованию систем связи и телекоммуникаций, создание новых технологий, удовлетворяющих растущим требованиям к качеству и скорости передачи информации. Наиболее перспективной в этом плане является передача информации по оптическому волокну (ОВ).

Одним из перспективных направлений совершенствования линий электрической проводной связи является внедрение оптических кабелей. Волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) находят все более широкое распространение, поэтому актуальными становятся вопросы измерения их параметров. Измерения характеристик ВОЛП в значительной мере зависят от специфики системы связи и условий их эксплуатации.

Как известно, применение цифровых систем передачи информации на железнодорожном транспорте связано с некоторыми трудностями, вызванными особенностями организации первичной сети связи ОАО «Российские железные дороги». Так, например, по одному и тому же магистральному волоконно-оптическому кабелю осуществляется связь магистрального и дорожного уровней.

Использование волоконно-оптического кабеля позволяет решить часть этих вопросов. Наличие широкой полосы пропускания у такого кабеля дает возможность использовать высокоскоростные цифровые системы передачи и тем самым обеспечить необходимое количество каналов магистральных и дорожных сетей. При оборудовании линий аппаратурой выделения цифровые каналы можно использовать и для нужд отделенческой связи.

Для определения повреждений ОВ используется метод обратного рассеивания. Технической реализацией этого метода является оптический рефлектометр.

Для объективной оценки качества монтажных работ и последующей эксплуатации оптических систем передачи монтажные и эксплуатационные подразделения должны располагать современным измерительным оборудованием, позволяющим получать достоверные результаты.

В пособии рассмотрены метрологические характеристики рефлектометра, принцип и режимы его работы (считывание файлов с диска, сохранение, получение и анализ рефлектограмм с последующим их документированием). Основное внимание уделено программному обеспечению рефлектометра и методике определения основных областей и характерных участков типичной рефлектограммы.

Даны рекомендации по анализу, сравнению и оформлению рефлектограмм для паспортизации участков ВОЛП при наличии в них сварных соединений и неоднородностей ОВ.

Растущие требования к увеличению каналов вызваны развитием Интернета и сотовой связи. Для решения этих задач проектируются и строятся новые высокоскоростные системы передачи при одновременной модернизации существующих систем. Скорость передачи информации уже достигает 10—40 Гбит/с. При создании систем передачи со скоростями в сотни Мбит/с основными факторами, ограничивающими длину регенерационного участка, являются затухание в оптическом кабеле и ширина полосы пропускания, обусловленная влиянием хроматической и поляризационной модовой дисперсии в волоконных световодах. Эти параметры требуют точного измерения не только в процессе производства волоконно-оптического кабеля (ВОК), но и при входном контроле перед его прокладкой, при ее завершении и в течение эксплуатации. Результаты таких измерений позволяют также принимать решение о возможности повышения скорости передачи по уже проложенным оптическим кабелям. Проведение подобных измерений является дорогостоящей и сложной технической задачей. В данной работе рассмотрен прибор, разработанный для измерения хроматической дисперсии, его технические характеристики и полученные с его помощью результаты, полученные в реальных условиях.

При создании высокоскоростных систем передачи необходимы точные знания о величине хроматической дисперсии в оптических кабелях, которая зависит от типа используемых ОВ.

Можно сформулировать следующие задачи, встающие сегодня перед операторами связи:

- обеспечение документирования, поддержание в исправном состоянии и контроль состояния волоконно-оптических сетей;
- повышение качества предоставляемых услуг при растущей конкуренции;
- оперативное и качественное проведение измерений при минимизации потерь, без снижения коэффициента готовности;
- подготовка высококвалифицированного инженерно-технического персонала.

Глава 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛП

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) информация передается на частотах около 200 ТГц, соответствующих ближнему инфракрасному диапазону оптического спектра 1500 нм. Волноводом в ВОСП является оптическое волокно (ОВ), способное передавать световое излучение на большие расстояния с малыми потерями, которые характеризуются затуханием. Скорость и дальность передачи информации определяются величиной искажений оптических сигналов из-за дисперсии и затухания. *Волоконно-оптическая сеть* — это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии. При создании таких сетей помимо вопросов, связанных с их топологией и собственно с волоконной оптикой, — еще и те, которые касаются электронного передающего оборудования, его стандартизации и протоколов передачи.

В настоящее время ОВ считается самой совершенной и перспективной физической средой для передачи больших потоков информации, в том числе и на значительные расстояния. Это обусловлено рядом особенностей, присущих оптическим волноводам.

По ним можно передавать широкополосные сигналы, поскольку несущая частота $f_0 = 10^{12} - 10^{14}$ Гц обеспечивает скорость передачи порядка 10^{12} бит/с (1 Тбит/с). Более конкретно, используя одно волокно, можно реализовать передачу информации по 10 млн телефонных каналов или по 1 млн видеоканалов. Объем информации может быть увеличен, если использовать свойство световых волн распространяться, не влияя друг на друга, сразу в двух направлениях и наличие двух ортогональных мод, существующих в сердечнике ОВ. В каждом случае будет происходить удвоение пропускной способности оптического канала. В настоящее время предел плотности информации, передаваемой по оптическому волокну, еще не достигнут.

Лучшие образцы ОВ имеют затухание 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без

регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более «прозрачные», так называемые фторцирконатные ОВ с теоретическим пределом затухания порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Эти исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками длиной 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с.

ОВ изготавливают из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного и недорогого материала, в отличие от меди. Они очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, кабельной технике. ОВ являются диэлектриками, поэтому при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка линии и аппаратуры. В кабеле ОВ электрически полностью изолированы друг от друга, и многие проблемы, связанные с электромагнитным влиянием, которые до сих пор возникали при эксплуатации электрических кабелей, теряют свою актуальность. Применяя в качестве центрального несущего элемента стеклопластик, на заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и поэтому безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на опорах контактных сетей, линиях автоблокировки и электропередачи как отдельно, так и встроенными в фазовый провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля.

Системы связи на основе ОВ устойчивы к электромагнитным влияниям, а передаваемая по ним информация лучше защищена от несанкционированного доступа. Возникающие неоднородности на ОВ могут быть обнаружены в ходе мониторинга целостности линии.

Важная особенность ОВ — долговечность, т.е. сохранение своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет с учетом экономической целесообразности наращивать пропускную способность путем замены аппаратуры передачи в зависимости от типа используемого ОВ.

Однако волоконно-оптические линии (ВОЛП) обладают и некоторыми недостатками. Полностью диэлектрические волоконно-оптические кабели (ВОК), подвешиваемые на опорах контактной сети участков железных дорог с электротягой переменного тока, подвер-

жены электротермической деградации вследствие электромагнитного влияния контактной сети и линии ДПР (два провода — рельс).

При создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в свет, и наоборот. Для соединения ОВ с приемопередающим оборудованием используются оптические коннекторы (соединители), которые должны обладать малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Допуски при изготовлении таких элементов не должны превышать долей микрона, т.е. быть сопоставимыми с длиной волны излучения, поэтому производство этих компонентов оказывается очень дорогостоящим. Для монтажа ОВ требуется прецизионное, следовательно, дорогое технологическое оборудование. Поэтому при аварии (обрыве) ВОК затраты на его восстановление выше, чем при работе с медножильными кабелями.

Преимущества от применения ВОЛП настолько значительны, что, несмотря на перечисленные недостатки ОВ, эти линии связи находят все большее распространение для передачи информации.

1.1. Волоконно-оптические кабели.

Условия эксплуатации оптического волокна и кабеля

Одним из важнейших компонентов ВОЛП является ВОК, определяющие параметры которого при производстве — это условия эксплуатации и пропускная способность линии связи.

По условиям эксплуатации на телекоммуникационных сетях кабели подразделяют на монтажные, станционные, зонавые и магистральные.

Согласно [14] оптический кабель (ОК) классифицируют в соответствии с областью применения, маркируемой буквами:

З — для подземной прокладки (в том числе в канализации, трубах, блоках, коллекторах, грунтах всех категорий, воде при пересечении болот, озер и рек с максимальной глубиной не более 10 м);

В — для воздушной прокладки (в том числе самонесущие с центральным или смещенным силовым элементом в общем шланге, наматываемые на провод или силовой элемент, или встроенные в них подвесные);

Г — для подводной прокладки с продольной и поперечной герметизацией (в том числе при пересечении болот, озер и рек глубиной более 10 м, морей и океанов, включая их прибрежные участки);

Н — для подвижных подводных негрузонесущих объектов морской техники (в том числе для внутриприборного монтажа, стационарной внутри-, межотсекowej и забортной прокладок через герметизирующие устройства высокого давления);

С — для прокладки внутри помещений и стационарных объектов (в том числе распределительные, абонентские, стационарные);

М — монтажные;

Ш — особо гибкие (шнуры);

Д — для дистанционного управления (в том числе прокладываемые в воздушной, надводной, подводной и подземных средах);

Б — бортовые (для подвижных объектов, работающих в воздушной, надводной и подводной средах);

П — для многократной прокладки в полевых условиях;

Ц — специального (целевого) назначения.

Условное обозначение марки ОК должно содержать:

1) буквы «ОК»;

2) букву, классифицирующую область применения;

3) буквы, характеризующие применение специальных материалов:

- НГ — негорючих;

- LS — с низким дымо- и газовыделением;

- HF — с пониженной коррозионной активностью продуктов дымо- и газовыделения;

- FR — огнестойких;

4) букву, указывающую на основной конструктивный признак сердечника ОК:

- М — оптический модуль, состоящий из полимерной или металлической трубки с расположенными в ней ОВ;

- Т — один или несколько оптических модулей, уложенных параллельно оси кабеля;

- О — ОВ в плотной защитной оболочке;

- Л — ленточный элемент с несколькими ОВ;

- П — профилированный сердечник с одним или несколькими ОВ в пазах сердечника;

- Д — прочее;

5) цифры, указывающие число модулей или лент с ОВ либо пазов в профилированном сердечнике;

6) цифры, обозначающие номер разработки;

7) цифры и буквы, обозначающие число ОВ и их тип;

8) коэффициент затухания на двух длинах волн для:

- одномодового волокна — 1,55 и 1,31 мкм;

- многомодового — 1,31 и 0,85 мкм;

9) цифры, обозначающие число токопроводящих жил (при их наличии).

Группы букв и цифр разделяют дефисами.

Пример: ОКЗ-М8-01-18Е1/6МГ1-0,19 (0,38)/0,7 (2,8)-2.

ОК для прокладки в земле, модульной конструкции, с восемью модулями, разработки 01, с 18 одномодовыми ОВ типа Е1 и шестью многомодовыми ОВ типа МП, с коэффициентом затухания в одномодовых волокнах 0,19 дБ/км на длине волны 1,55 мкм и 0,38 дБ/км на длине волны 1,31 мкм и в многомодовых волокнах — 0,7 дБ/км на длине волны 1,31 мкм и 2,8 дБ/км на длине волны 0,85 мкм, с двумя токопроводящими жилами.

Монтажные и станционные кабели, предназначенные для прокладки внутри зданий и сооружений, компактны, легки и, как правило, имеют небольшую строительную длину.

Зоновые и магистральные кабели предназначены для прокладки в кабельной канализации, пластмассовых трубопроводах, грунте, на опорах контактных сетей, ЛЭП и под водой. Эти кабели имеют защиту от внешних воздействий и строительную длину более 2 км. Используются следующие основные виды подвески оптического кабеля: самонесущая, подвеска без несущих силовых элементов, с креплением к несущим элементам (тросам, проводам и др.) или с помощью специально монтируемых несущих элементов.

ОК должен подвешиваться на опорах при условии, что их несущая способность достаточна для восприятия всех действующих и дополнительных нагрузок от него, а расположение самого кабеля не препятствует нормальному техническому обслуживанию линии, на которой он подвешивается.

Подвеска ОК на опорах контактной сети железных дорог осуществляется с полевой стороны при обеспечении нормируемых расстояний от проводов, сооружений и поверхности земли. Его переходы с одной стороны электрической железной дороги на другую выполняются под землей с использованием кабельного канала из неметаллических труб либо по воздуху с подвеской кабеля на дополнительно установленных опорах. Расстояние перехода от фундамента ближайшей опоры контактной сети должно составлять не менее 10 м, а угол пересечения им железной дороги должен быть близок к 90°.

При подвеске ОК на опорах предварительно устанавливаются раскаточные ролики, по которым протягивается диэлектрический трос-лидер, соединенный через вертлюг и кабельный чулок с барабаном ОК, установленным на подъемно-тормозном устройстве. Протяжка троса-лидера с прикрепленным к нему ОК производится плавно лебедкой. Одновременно членами бригады, оснащенными биноклями и переносными радиостанциями, визуально контролируется наличие у него провисаний и закручиваний по трассе. При подходе во время протяжки стыка троса-лидера и ОК к раскаточному ролику ее скорость, которая находится в пределах 1,8 км/ч, снижается до минимума.

Работы по закреплению ОК в расчетном положении производят не позднее, чем через 48 ч после его раскатки. В ходе этих работ закрепляют ОК на опорах натяжными зажимами, перекалывают его с роликов в поддерживающие зажимы, укладывают и закрепляют на опорах технологические запасы длин. В качестве натяжных и поддерживающих зажимов преимущественно применяют спиральные.

Монтаж муфт подвесного ОК производится аналогично его монтажу при прокладке в грунт с помощью специально оснащенных автомашин. Смонтированные муфты и технологический запас длины ОК крепятся на опорах на расстоянии не менее 6 м от уровня грунта.

Подвеска ОК с креплением к внешним несущим элементам (с шагом 50—60 см), применяемая на опорах линий связи, идентична технике подвески медножильных кабелей. Если масса ОК относительно велика, в качестве подвесов используют оцинкованные или стойкие к воздействию солнечного излучения пластмассовые хомуты.

Диэлектрический ОК в ряде случаев (например, на экстремально больших пролетах ЛЭП при переходах через водные преграды) навивают на грозозащитный трос или фазный провод линии электропередачи с помощью специальной машины.

При спуске диэлектрический подвесной ОК, вводимый в помещение объекта связи или уходящий под землю, крепят к опоре специальными зажимами с шагом не более 2 м. На нижнем участке спуска его дополнительно защищают от повреждения стальным угольником или трубой. Спуск ОК, встроенного в грозозащитный трос, производят переходным диэлектрическим ОК.

Для обеспечения большой пропускной способности линии связи производятся ВОК, содержащие небольшое число (до 8) одномодовых волокон с малым затуханием, а кабели для распределительных

сетей могут содержать до 144 как одномодовых, так и многомодовых волокон, в зависимости от расстояний между сегментами сети.

При изготовлении ВОК преимущественно используются следующие конструкции его сердечника:

- со свободным перемещением элементов;
- с жесткой связью между элементами.

Конструктивно различают кабели повивной и пучковой скрутки, с профильным сердечником и ленточные. Существуют многочисленные комбинации конструкций ВОК, которые в сочетании с большим ассортиментом применяемых материалов позволяют выбрать исполнение, наилучшим образом удовлетворяющее всем условиям проекта, в том числе экономическим.

Особый класс образуют кабели, встроенные в грозозащитный трос (ОВ укладываются в стальные трубки, которые заменяют провод заземления), используемые для подвески на опорах воздушных ЛЭП [4]. Они характеризуются способностью выдерживать большие механические и электрические нагрузки, обладают высокой стойкостью к ударам молний и к вибрации, предназначены для соединения электростанций и станций управления, используя действующие высоковольтные линии.

1.1.1. Соединение оптических волокон

Развитие волоконно-оптических телекоммуникационных технологий в основном определяется качеством ВОК на многомодовых и одномодовых ОВ, изготовленных методом покрытия кварцевой жилы полимерными или кварцевыми материалами. Показатели некоторых из этих волокон в настоящее время по ряду характеристик приблизились к предельно возможным. Это позволило строить регенерационные участки длиной до 200 км и более, снижая тем самым затраты на создание волоконно-оптических линий связи. Однако ввиду естественных ограничений производить волокна такой длины не представляется возможным, поэтому осуществляют их соединение. Снижение коэффициента затухания ОВ обуславливает ужесточение требований к качеству соединений, поскольку их число, как правило, достаточно велико. Иные требования предъявляются к устройствам соединения ВОК, предназначенных для локальных сетей, имеющих небольшие длины участков. Данные устройства должны быть компактными, допускать многоразовое соединение и отличаться простотой его выполнения [5].

1.1.2. Требования к волоконно-оптическим кабелям

Требования к ВОК в значительной степени определяются условиями их изготовления, хранения, прокладки, монтажа, эксплуатации и т.п. [14], в зависимости от которых они могут подвергаться различным внешним воздействиям. Стойкость к механическим воздействиям в значительной степени определяется условиями прокладки и эксплуатации. Например, кабели, прокладываемые в грунте механизированным способом, должны быть стойкими к деформациям на сжатие и растяжение; подвесные, подводные и полевые — только к последним, а для внутриобъектных эти требования не существенны, поскольку при их прокладке на первый план выходят деформации на изгиб. В нестандартных, тяжелых условиях работы используются специальные кабели. ВОК используются в различных климатических зонах, поэтому они должны быть стойкими к воздействию пониженного атмосферного давления до $5,3 \cdot 10^4$ Па, повышенной относительной влажности до 98 % при температуре +35°C, инея, росы, соляного тумана и солнечного излучения. К ним также предъявляются требования по стойкости к воздействию биологических факторов. Для средней полосы это, прежде всего, грызуны, для тропиков — микроорганизмы, термиты, плесень.

Наибольший допустимый интервал рабочих температур необходим для работы подвесных ВОК. Прямые солнечные лучи могут повысить температуру кабеля относительно окружающего воздуха на 25°C. Условная максимальная температура окружающего воздуха в летнее время (на территории России) может достигать +35°C, следовательно, ОК должен нормально работать и при +60°C. В зимнее время года температура обычно не опускается ниже -40°C, однако испарение влаги с поверхности кабеля уменьшает его температуру. Поэтому диапазон рабочих температур подвесных ВОК находится в пределах от -60 до +60°C. Кабели, предназначенные для укладки в грунт, должны быть стойкими к воздействию температур до +50°C, так как они, в отличие от подвесных, не подвергаются воздействию прямых солнечных лучей. В кабельной канализации, коллекторах, внутри зданий и сооружений существуют свои источники тепла, например, проходящие рядом силовые кабели, поэтому верхний предел температуры будет не +30°C, а +50°C. Нижний предел температур для таких ОК ограничивается минимальной температурой окружающей среды, для внутриобъектовых принятой -10°C и -40°C —

для остальных. Указанные параметры характерны для ВОК, используемых в средней полосе или странах с подобным климатом. Они могут существенно различаться в зависимости от рассматриваемого региона. Кроме того, подвесные оптические кабели должны отличаться стойкостью к воздействию электромагнитных полей, разрядов (молнии), озону, а также не иметь металлических элементов.

1.2. Оптическое волокно. Общие положения

Важнейший из компонентов ВОЛП — оптическое волокно. Для передачи сигналов применяются два его вида: одномодовое и многомодовое. Свое название они получили от способа распространения в них излучения.

ОВ (рис. 1.1) состоит из сердцевины, в которой происходит распространение световых волн, и оболочки, предназначенной, с одной стороны, для создания лучших условий отражения на границе сердцевина — оболочка, а с другой — для снижения излучения энергии в окружающее пространство. С целью повышения прочности и тем самым надежности волокна оболочка, как правило, покрывается защитным упрочняющим материалом.

Такая конструкция ОВ используется в большинстве ОК в качестве базовой [5]. Сердцевина изготавливается из оптически более

плотного материала. ОВ отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины, т.е. зависимостью показателя преломления от расстояния от оси ОВ.

Все ОВ делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber). В многомодовых ОВ, имеющих диаметр светонесущей жилы на порядок больше длины волны переда-



Рис. 1.1. Общий вид типового ОВ

чи, распространяются различные световые лучи — моды. Такие волокна разделяются по профилю показателя преломления на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber).

1.3. Распространение световых лучей в оптических волокнах

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в ОВ наряду с длиной волны излучения, являются его геометрические параметры, величина затухания и дисперсия сигнала.

При распространении оптического излучения вдоль ОВ используется явление полного внутреннего отражения на границе сред с разными показателями преломления. Процесс распространения световых лучей в оптически более плотной среде, окруженной менее плотной, показан на рис. 1.2. Угол полного внутреннего отражения, характеризующий переход света из оптически более плотной в менее плотную среду, определяется соотношением

$$\theta_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1), \quad (1.1)$$

где n_1 — показатель преломления сердцевины ОВ;

n_2 — показатель преломления оболочки ОВ, причем $n_1 > n_2$.

При попадании света на торец ОВ в последнем могут распространяться три типа лучей: направляемые, вытекающие и излучае-

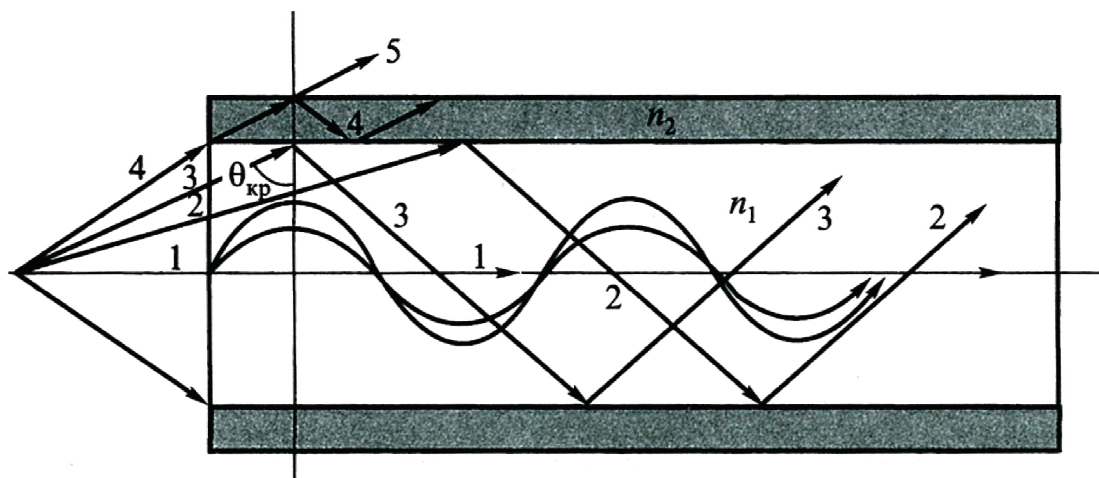


Рис. 1.2. Распространение излучения по ступенчатому и градиентному многомодовому и одномодовому ОВ

мые. Наличие и преобладание какого-либо из них определяется углом падения на границу раздела сердцевина — оболочка. Лучи, которые падают на границу раздела под углом $\theta \geq \theta_{кр}$ (лучи 1, 2 и 3), отражаются от нее и вновь возвращаются в сердцевину волокна, распространяясь в ней и не претерпевая преломления. Так как траектории таких лучей полностью расположены внутри сердцевины волокна, они распространяются на большие расстояния и называются *направляемыми*.

Лучи, падающие на границу раздела под углами $\theta < \theta_{кр}$ (лучи 4), носят название *вытекающих* (лучей оболочки), которые при достижении границы сердцевина — оболочка отражаются и преломляются, теряя каждый раз в оболочке волокна часть энергии и исчезая на некотором расстоянии от его торца. Лучи, уходящие из оболочки в окружающее пространство (лучи 5), называются *излучаемыми*, возникающими в местах нерегулярностей или обусловленными скручиванием ОВ. Излучаемые и вытекающие лучи являются паразитными и приводят к рассеянию энергии и искажению информационного сигнала.

1.4. Моды, распространяющиеся в оптических волноводах

В общем случае распространение электромагнитных волн описывается системой уравнений Максвелла в дифференциальной форме

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j}, \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho, \end{aligned} \tag{1.2}$$

где ρ — плотность электрического заряда;

\vec{E} и \vec{H} — напряженности электрического и магнитного полей соответственно;

\vec{j} — плотность тока;

\vec{D} и \vec{B} — электрическая и магнитная индукции.

Если представить \vec{E} и \vec{H} , используя преобразования Фурье [5]

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(r, \omega) e^{-j\omega t} d\omega, \\ \vec{H}(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{H}(r, \omega) e^{-j\omega t} d\omega,\end{aligned}\tag{1.3}$$

то волновые уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \tilde{E} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{E} &= 0, \\ \nabla^2 \tilde{H} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{H} &= 0,\end{aligned}\tag{1.4}$$

где ∇ — оператор Лапласа.

Световод можно представить идеальным цилиндром с продольной осью z , оси x и y образуют горизонтальную (xoz) и вертикальную ($yoiz$) плоскости. В этой системе, где E и H ортогональны, существуют 4 класса волн:

- поперечные T : $E_z = H_z = 0$; $E = E_y$; $H = H_x$;
- электрические E : $E_z = 0$, $H_z = 0$; $E = (E_y, E_z)$, распространяющиеся в плоскости ($yoiz$); $H = H_x$;
- магнитные H : $H_z = 0$, $E_z = 0$; $H = (H_x, H_z)$, распространяющиеся в плоскости (xoz), $E = E_y$;
- смешанные EH или HE : $E_z = 0$, $H_z = 0$; $E = (E_y, E_z)$, $H = (H_x, H_z)$, распространяющиеся в плоскостях (xoz) и ($yoiz$).

Систему уравнений Максвелла удобнее записать в цилиндрической системе координат (z, r, ϕ) , а решение искать для волн с компонентами E_z, H_z вида

$$\begin{aligned}E_z(r, \omega) &= A(\omega) F(r) e^{jm\phi} e^{-j\beta z}, \\ H_z(r, \omega) &= B(\omega) F(r) e^{jm\phi} e^{-j\beta z},\end{aligned}\tag{1.5}$$

где $A(\omega)$ и $B(\omega)$ — нормирующие постоянные;

$F(r)$ — искомая функция;

β — продольный коэффициент распространения волны.

Решения $F(r)$ получаются в виде наборов из m (m — целое) простых функций Бесселя $J_m(k_c r)$ для сердцевины и модифицированных функций Ханкеля $H_m(k_{об} r)$ для оболочки, где $k_c = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2}$ и $k_{об} = \sqrt{n_2^2 k^2 - \beta^2}$ — поперечные коэффициенты распространения в сердцевине и оболочке соответственно, $k = n\omega$ — волновое число. Параметр β определяется как решение характеристического уравнения, получаемого из граничных условий, требующих непрерывности тангенциальных составляющих компонент E_z и H_z электромагнитного поля на границе раздела сердцевины и оболочки. Характеристическое уравнение, в свою очередь, дает набор из n решений (n — целое) для каждого m , т.е. имеем mn собственных значений β_{mn} с соответствующими им определенными типами волн, называемых *модами*.

Условием существования направляемой моды является экспоненциальное убывание ее поля в оболочке вдоль координаты r , что определяется значением поперечного коэффициента распространения в оболочке. При $k_{об} = 0$ устанавливается критический режим, при котором невозможно существование направляемой моды, что соответствует [5]

$$J_0(k_c r) = 0, \quad (1.6)$$

имеющему бесчисленное множество решений

$$k_c r = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)(kr)^2 - (k_{об} r)^2} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) \left(2 \frac{\pi r}{\lambda}\right)^2 - (k_{об} r)^2}. \quad (1.7)$$

Введем величину, называемую *нормированной частотой* V , которая связывает структурные параметры ОВ и длину световой волны, и определяемую выражением

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi r}{\lambda} NA, \quad (1.8)$$

где $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ — числовая апертура ОВ.

При $k_{06} = 0$ для каждого из решений уравнения (1.6) имеет место критическое значение нормированной частоты V_{nm} ($m = 1, 2, 3...; n = 0, 1, 2, 3...$): $V_{01} = 2,405$; $V_{02} = 5,520$ и т.д.

Для моды HE_{11} критическое значение нормированной частоты $V_{11} = 0$. Эта мода распространяется при любой частоте и структурных параметрах волокна и является *фундаментальной модой* ступенчатого ОВ. Выбирая параметры ОВ, можно добиться распространения только этой моды, которое определяется условием

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405. \quad (1.9)$$

Минимальная длина волны, при которой в ОВ распространяется фундаментальная мода, называется *волоконной длиной волны отсечки*. Ее значение определяется из (1.9) как

$$\lambda_{SF} = \frac{2\pi r \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405}. \quad (1.10)$$

1.5. Одномодовые оптические волокна

Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые (step index single mode fiber) или стандартные волокна SF (standard fiber), волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion-shifted single mode fiber) и волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (nonzero dispersion-shifted single mode fiber).

В оптическом волокне SF (рис. 1.3, в) диаметр светонесущей жилы составляет 8—10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света $\lambda > \lambda_{SF}$ (λ_{SF} — длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в ОВ реализуется в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается при длине волны близкой к 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в нуль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В

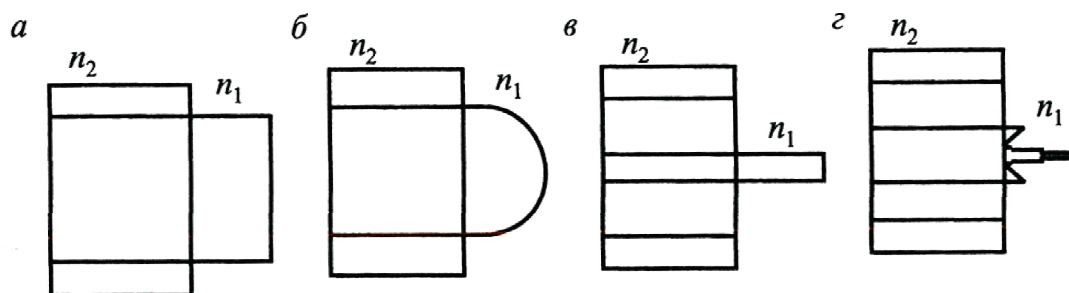


Рис. 1.3. Профили показателя преломления:

а — ступенчатого многомодового волокна; *б* — градиентного многомодового волокна; *в* — одномодового волокна; *г* — одномодового волокна со смещенной дисперсией

нем потери составляют 0,3—0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,20—0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

В оптическом волокне (см. рис. 1.3, г) DSF длина волны, на которой дисперсия обращается в нуль l_0 , смещена в окно прозрачности 1550 нм. Это смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 км и более. Следовательно, единственная рабочая длина волны берется близкой к 1550 нм.

Оптическое волокно NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи сразу нескольких длин волн (мультиплексного волнового сигнала) и наиболее эффективно может использоваться при построении *полностью оптических сетей* — сетей, на узлах которых не происходит оптоэлектронного преобразования при распространении оптического сигнала.

Применение трех перечисленных типов одномодовых ОВ не означает их узкой специализации для передачи сигналов по SF на длине волны 1310 нм, по DSF на длине волны 1550 нм, по NZDSF в окне 1530—1560 нм. Так, например, мультиплексный сигнал в этом окне можно передавать и по волокну SF [5]. Однако длина безретрансляционного участка при этом будет меньше, чем при использовании NZDSF, вследствие большей величины хроматической дисперсии. Максимальное допустимое расстояние определяется техническими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией), так

и приемопередающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

В ВОЛП наиболее широко используются следующие стандарты волокон:

- многомодовое градиентное волокно 50/125;
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125;
- одномодовое ступенчатое волокно SF 8 — 10/125;
- одномодовое волокно DSF 8 — 10/125;
- одномодовое волокно NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно похоже на DSF).

1.6. Константа распространения и фазовая скорость

Волновое число k можно рассматривать как вектор, называемый *волновым*, совпадающий по направлению с распространением света в трехмерных средах. В среде с показателем преломления n_1 величина волнового вектора равна kn_1 . В случае распространения света внутри волновода с его направлением совпадает направление проекции β волнового вектора k на ось волновода

$$\beta = n_1 k \sin i = n_1 k \cos \theta, \quad (1.11)$$

где θ — угол, дополняющий угол i до 90° (или угол между лучом и осью, как показано на рис. 1.4), β называется *константой распространения* и играет такую же роль в волноводе, как волновое число k в свободном пространстве [6]. Так как $\beta = \beta(\lambda)$, то в соответствии с формулой (1.11) θ и i зависят от длины волны.

Угол падения i изменяется между i_c и $\frac{\pi}{2}$. Следовательно,

$$kn_1 < \beta < kn_2. \quad (1.12)$$

Таким образом, величина константы, характеризующей распространение света внутри волновода, всегда лежит между значениями волновых чисел плоской световой волны в материале серд-

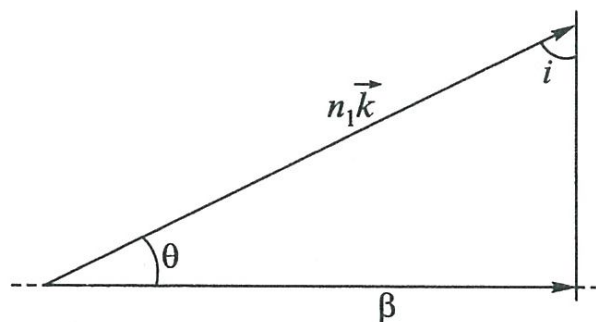


Рис. 1.4. Волновой вектор и константа распространения

цевины и оболочки. Если учесть, что $c = \frac{\omega}{k}$, то можно переписать это соотношение на языке фазовых скоростей

$$\frac{c}{n_1} < v < \frac{c}{n_2}. \quad (1.13)$$

Фазовые скорости распространения мод $v = \frac{\omega}{\beta}$ заключены между фазовыми скоростями волн в двух трехмерных материалах.

Скорость распространения светового сигнала, или *групповая скорость* — это скорость распространения огибающей светового импульса. В общем случае групповая скорость u не равна фазовой скорости. Различие фазовых скоростей мод приводит к искажению входного пучка света по мере его распространения в волокне.

В волокне с параболическим градиентным показателем преломления наклонные лучи распространяются по криволинейной траектории, которая, естественно, длиннее пути распространения аксиального луча. Однако из-за уменьшения показателя преломления, по мере удаления от оси волокна, скорость распространения составляющих светового сигнала при приближении к оболочке ОВ возрастает, поэтому время распространения составляющих по ОВ оказывается примерно одинаковым. Следовательно, дисперсия, или изменение времени распространения различных мод, сводится к минимуму, а ширина полосы пропускания волокна увеличивается. Точный расчет показывает, что разброс групповых скоростей различных мод в таком волокне существенно меньше, чем в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. ОВ, которые могут поддерживать распространение только моды самого низкого порядка, называются *одномодовыми*.

Таким образом, каждая мода, распространяющаяся в ОВ, характеризуется постоянным по длине световода распределением интенсивности в поперечном сечении, постоянной распространения β , а также фазовой v и групповой u скоростями распространения вдоль оптической оси, которые различны для разных мод. Различия в фазовых скоростях мод волнового фронта приводят к тому, что распределение поля в поперечном сечении изменяется вдоль оси волокна, а различия в их групповых скоростях — к явлению, называемому *межмодовой дисперсией*.

В одномодовом волокне существует только одна мода распространения, поэтому такое волокно характеризуется постоянным распределением поля в поперечном сечении, в нем отсутствует межмодовая дисперсия, и по нему можно передавать излучение с очень широкой полосой модуляции, ограниченной только другими видами дисперсии.

Многомодовое волокно поддерживает большое количество мод, что приводит к возникновению межмодовой дисперсии. Вследствие того, что все моды распространяются в ОВ по различным траекториям, огибающие модулированного светового сигнала различных мод по мере распространения по волокну все больше отличаются по фазе. При использовании цифровой системы каждая мода передает информационный импульс, время распространения которого отличается от времени распространения импульса другой моды, вызывая изменение формы результирующего импульса на выходе ОВ, в частности, увеличение длительности и уменьшение амплитуды переданного импульса. Межмодовая дисперсия обычно ограничивает расстояние передачи многомодового кабеля до 1 км и менее, обеспечивая битовую скорость до 1 Гб/с.

Метод измерения межмодовой дисперсии по искажению импульса. Определение межмодовой дисперсии сводится к измерению полосы частот многомодового волокна на различных длинах волн по схеме, представленной на рис. 1.5.

В данной схеме используется перестраиваемый источник оптического излучения, который подсоединяется через модовый скремблер ко входу тестируемого волокна, подключенного выходом ко входу оптического приемника, который соединен со стробоскопическим осциллографом и

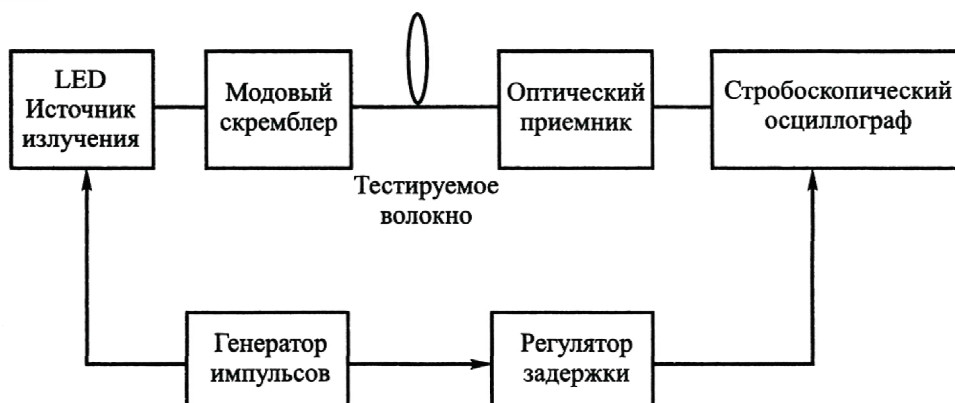


Рис. 1.5. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна импульсным методом

генератором импульсов, предназначенным для устранения помех, фазового дрожания и расчета параметров импульса. Для того, чтобы на результаты измерений не оказывала существенного влияния хроматическая дисперсия, спектр источника излучения задается достаточно узким.

В процессе измерения в тестируемом волокне возбуждается импульс излучения заданной длительности, а выходной импульс преобразуется в цифровую форму, включая передний и задний фронты, начиная с 0,01 уровня амплитудного значения. Затем таким же образом измеряется входной импульс, в этом случае вместо тестируемого волокна используется эталонное волокно, которое представляет собой короткий, длиной в несколько метров, отрезок волокна, имеющего близкие оптические характеристики. Для того, чтобы минимизировать разницу в задержке распространения излучения в тестируемом и эталонном оптических волокнах, осциллограф и генератор сигналов синхронизируются входным импульсом через регулируемый элемент задержки.

Функция преобразования тестируемого волокна в этом случае имеет вид

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)}, \quad (1.14)$$

где $B(f)$ и $A(f)$ — преобразования Фурье входного и выходного импульсов соответственно.

Полоса частот волокна определяется как самая низкая частота, для которой $|H(f)| = 0,5$.

Как видно из данной схемы, измерение полосы частот волокна зависит как от условий оптического возбуждения, так и от способа коммутации оптических волокон. Поэтому для обеспечения повторяемости результатов измерений на входе тестируемого волокна должно быть установлено устройство скремблирования, которое задает режим возбуждения большого количества мод.

Метод измерения межмодовой дисперсии в частотной области. Данный метод измерения полосы пропускания многомодового волокна приведен на рис. 1.6, где узкополосный оптический сигнал модулируется по амплитуде синусоидальным сигналом генератора качающейся частоты и вводится через устройство скремблирования в тестируемое волокно. Модулированные сигналы со входа и выхода ОВ подаются на оптические приемники, которые фиксируют соответствующие оптические мощности $P_2(f)$ и $P_1(f)$ как функции час-

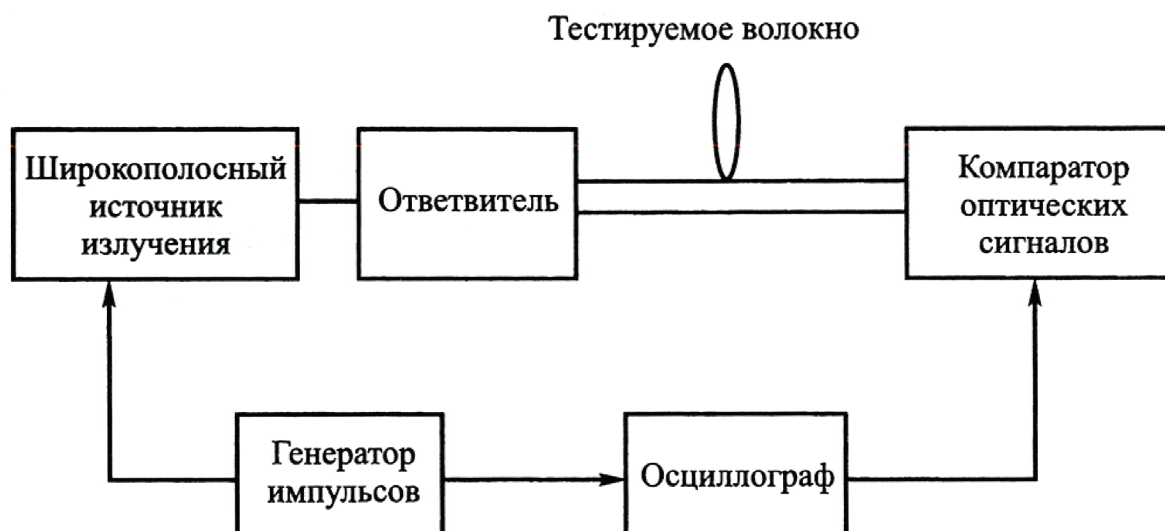


Рис. 1.6. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна частотным методом

тоты модуляции. При этом обычно первыми проводятся измерения с тестируемым волокном, а затем при помощи короткого эталонного волокна определяется входной сигнал. В результате измерений получают амплитудно-частотную характеристику вида

$$H(f) = \log_{10} \left[\frac{P_2(f)}{P_1(f)} \right], \quad (1.15)$$

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

Функции источника и приемника могут выполняться с использованием анализатора либо оптического спектра, либо электрического — с соответствующим входным преобразователем. Задание частоты модуляции и отображение частотной характеристики осуществляются автоматически, однако, когда используется анализатор электрического спектра с внешним лазерным источником и фотоприемником, необходимо проявлять внимательность при интерпретации частотной характеристики. Такой анализатор измеряет мощность по электрическому сигналу фотоприемника, а фотодиод создает ток, пропорциональный оптической мощности, поэтому анализатор будет показывать изменение на 6 дБ при изменении оптического уровня на 3 дБ.

Глава 2. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ И ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОР- МАЦИИ

2.1. Затухание в оптическом волокне

По мере распространения света в оптической среде он ослабевает. Этот процесс называется *затуханием среды* — *затуханием ОВ*. Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передача сигналов по волокну осуществляется в трех диапазонах: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм, так как именно в них кварц имеет повышенную прозрачность. Затухание в ОВ обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями, обусловленными:

- собственным поглощением кварцевого стекла $\alpha_{\text{п}}$;
- рэлеевским рассеянием $\alpha_{\text{р}}$;
- примесным поглощением $\alpha_{\text{пр}}$;
- затуханием в инфракрасной области $\alpha_{\text{ик}}$; эти потери зависят от длины волны λ , примерный вид зависимостей приведен на рис. 2.1.
- рассеянием на дефектах и микроизгибах $\alpha_{\text{п}}$;
- бриллюэновским рассеянием $\alpha_{\text{бр}}$.

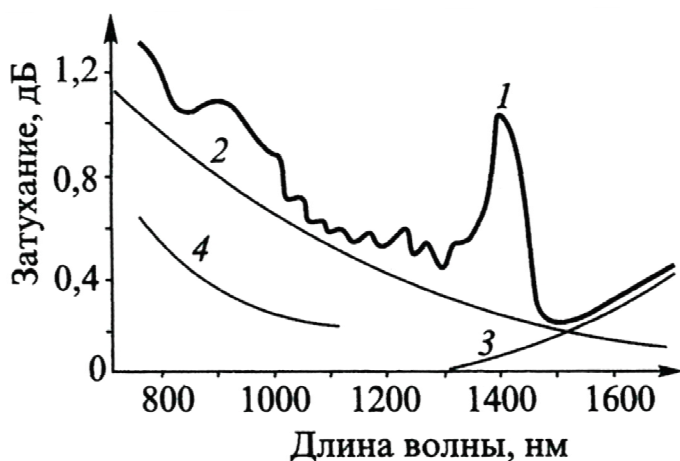


Рис. 2.1. Затухание оптического волокна:
1 — с учетом примесей; 2 — обусловленное рэлеевским рассеянием;
3 — вызванное поглощением света в инфракрасной области;
4 — обусловленное собственным поглощением кварцевого стекла

Кроме указанных потерь, в ОВ присутствуют дополнительные разновидности затухания, вызванные:

- степень потерь определяется коэффициентом затухания α , который в общем виде равен

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{ик}} + \alpha_{\text{бр}}, \quad (2.1)$$

где $\alpha_{\text{р}}$ — коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским рассеянием на неоднородностях материала ОВ, размеры которых значительно меньше длины световой волны, и тепловыми флуктуациями показателя преломления;

$\alpha_{\text{пр}}$ — коэффициент затухания, вызванный присутствующими в ОВ примесями, приводящими к дополнительному поглощению оптической мощности; это ионы металлов (Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), вызывающие поглощение в диапазоне длин волн 0,6—1,6 мкм, и гидроксильные группы (ОН), из-за которых появляются резонансные всплески затухания $\alpha(\lambda)$ на длинах волн 0,75, 0,97 и 1,39 мкм;

$\alpha_{\text{к}}$ — дополнительные потери, определяемые деформацией ОВ в процессе изготовления кабеля, вызванной скруткой, изгибом, отклонением от прямолинейного расположения и термомеханическими воздействиями, имеющими место при наложении оболочек и покрытий на сердцевину волокна при изготовлении ОК (их называют кабельными);

$\alpha_{\text{ик}}$ — коэффициент затухания, зависящий от длины волны оптического излучения и за счет поглощения в инфракрасной области возрастающий в показательной степени с увеличением длины волны.

Собственное поглощение кварцевого стекла определяется поглощением фотонов, при котором энергия фотона переходит в энергию электронов или в колебательную энергию атомной решетки. Спектр такого поглощения лежит в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0,4$ мкм), а спектр поглощения решетки — в инфракрасной области ($\lambda > 7$ мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1,3—1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, составляют порядка 0,03 дБ/км.

Что касается рэлеевского рассеяния, то оно определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра. Рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в фазе плавления, фиксируются в структуре кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны λ .

В настоящее время в технике связи в основном применяются кварцевые ОВ, область эффективного использования которых находится в диапазоне длин волн до 2 мкм. На более длинных волнах в качестве материала для волокна используются галоидные, халькогенидные и фторидные стекла. По сравнению с кварцевыми волокнами они обладают большей прозрачностью и обеспечивают снижение потерь на несколько порядков. С появлением ОВ, изготовленных из новых материалов, становится реальным создание ВОЛП без ретрансляторов.

Затухание оптического волновода учитывается при расчете энергетического бюджета. Затухание оптоволоконной линии с учетом потерь на разъёмных соединениях и сростках (неразъёмных соединениях) определяется по формуле

$$A = A_{\text{нс}} n_{\text{нс}} + \alpha L + A_{\text{рс}} n_{\text{рс}}, \quad (2.2)$$

где $A_{\text{нс}}$ и $A_{\text{рс}}$ — значения потерь на сростке и разъёме соответственно;

$n_{\text{нс}}$ и $n_{\text{рс}}$ — количество сростков и разъёмных соединений на протяжении оптоволоконной линии длиной L ;

α — километрический коэффициент затухания оптического волокна, измеряемый в дБ/км.

Тогда энергетический бюджет рассчитывается по формуле

$$A_{\text{эб}} = P_{\text{вых}} - P_{\text{фпр}} - A_{\text{эза}} - A_{\text{эзк}} - A, \quad (2.3)$$

где $P_{\text{вых}}$ и $P_{\text{фпр}}$ — мощность источника оптического излучения и чувствительность фотоприемника соответственно (дБ);

$A_{\text{эза}}$ и $A_{\text{эзк}}$ — эксплуатационные запасы для аппаратуры и кабеля соответственно, (дБ), которые берутся из технических условий (контрактных спецификаций) для оборудования ВОЛП.

2.2. Дисперсия

Световой сигнал в цифровых системах передачи поступает в световод импульсами, которые вследствие некогерентности реальных источников излучения содержат составляющие различной частоты. Уширение светового импульса, вызываемое различием времени распространения его спектральных и поляризационных компонент, и называется *дисперсией*.

Световая волна, распространяющаяся вдоль направления x , описывается уравнением

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx), \quad (2.4)$$

где A — амплитуда световой волны;

ω — ее угловая частота;

k — волновое число;

t — время.

Если взять фиксированное значение фазы волны

$$\omega t - kx = \text{const}, \quad (2.5)$$

то скорость перемещения фазы в пространстве или фазовая скорость будет:

$$v = \frac{\omega}{k}. \quad (2.6)$$

Световой импульс, распространяющийся в ОВ, представляет собой суперпозицию электромагнитных волн с частотами, заключенными в интервале $\Delta\omega$, которая называется *группой волн* вида (2.4). В момент времени t в разных точках для разных x волны будут либо усиливать друг друга, что приведет к появлению максимума интенсивности группы волн (центр группы волн), либо ослаблять. Центр группы волн перемещается со скоростью

$$u = \frac{d\omega}{dk}, \quad (2.7)$$

называемой *групповой*. Заменив $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и имея $\omega = vk$, получим соотношение, выражающее зависимость групповой скорости от длины волны

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (2.8)$$

Эта зависимость и является причиной, приводящей к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра по оптическому волокну. В результате по мере распространения по оптическому волокну частотные составляющие достигают приемника в разное время. Вследствие этого импульсный сигнал на выходе ОВ видоизменяется, становясь «размытым». Это явление

называется *волноводной дисперсией*, определяемой показателем преломления ОВ и шириной спектра излучения источника $\Delta\lambda$, и имеющей размерность времени [5]

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda L \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda L N(\lambda), \quad (2.9)$$

где Δ — относительная разность показателей преломления сердцевинки и оболочки;

L — длина ОВ;

$N(\lambda)$ — коэффициент волноводной дисперсии, называемый *удельной волноводной дисперсией*.

Зависимость удельной волноводной дисперсии от длины волны показана на рис. 2.2, на котором обозначены: N — коэффициент волноводной дисперсии, CD — хроматической дисперсии, M — материальной дисперсии.

Скорость распространения волны зависит не только от частоты, но и от среды, в которой это происходит. Для объяснения этого явления электроны внутри атомов и молекул рассматриваются в теории дисперсии квазиупруго связанными. При прохождении световой волны через вещество электроны оказываются под воздействием электрической

силы и начинают совершать вынужденные колебания. Это приводит к возникновению вторичных волн, распространяющихся со скоростью c , которые, складываясь с первичной, образуют результирующую волну.

Результирующая волна распространяется в веществе с фазовой скоростью v , и чем ближе частота первичной волны к собственной частоте электронов, тем сильнее будут их вынужденные колебания, а различие между v и c будет больше, что объясняет зависимость $v = v(\omega)$. В результате смещения электронов

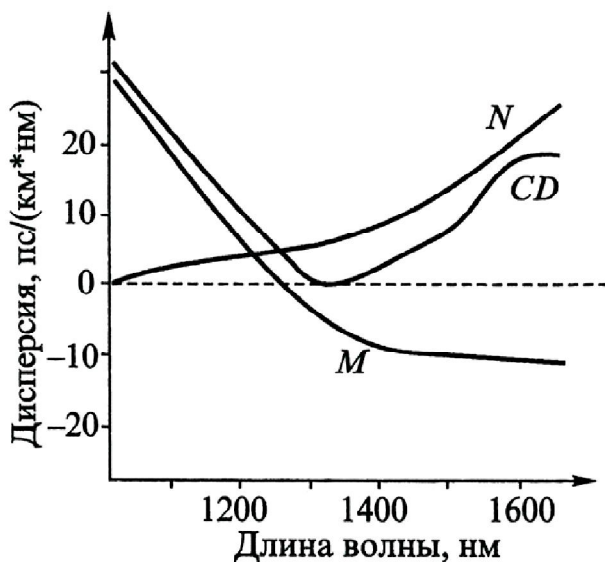


Рис. 2.2. Зависимости коэффициентов волноводной, материальной и результирующей хроматической дисперсии от длины волны

из положений равновесия молекула вещества приобретает электрический дипольный момент. То есть при взаимодействии электромагнитной волны со связанными электронами отклик среды зависит от частоты светового импульса, а значит показатель преломления — от длины волны, которая характеризует дисперсионные свойства оптических материалов

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\pi mc^2} \sum_i \frac{\left(\frac{e_i^2}{m_i}\right) \lambda_{0i}^2 \lambda^2}{\lambda_{0i}^2 - \lambda^2}, \quad (2.10)$$

где N — плотность частиц (число частиц в единице объема);

m и e — масса и заряд электрона соответственно;

λ_{0i} — резонансные длины волн;

$f_i = \frac{e_i^2}{m_i}$ — электрические силы, вынуждающие осцилляции.

В широком спектральном диапазоне, включающем обычный ультрафиолет, видимый свет и ближнюю инфракрасную область, кварцевое стекло прозрачно и формула Солмейера (2.10) применима и дает высокую точность [5], [7].

Явление, обусловленное поглощением средой электромагнитного излучения определенной частоты вследствие осцилляции связанных электронов, определяющее уширение длительности светового импульса после прохождения через нее, называется в технике волоконно-оптической связи *материальной дисперсией* [5]

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda L \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda L M(\lambda), \quad (2.11)$$

где коэффициент $M(\lambda)$ называется удельной материальной дисперсией.

На длине волны $\lambda = 1276$ нм у кварца величина $\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = 0$, следовательно, коэффициент материальной дисперсии $M(\lambda) = 0$ (см. рис. 2.2).

При длине волны $\lambda > 1276$ нм $M(\lambda)$ меняет знак и принимает отрицательные значения, в результате чего на длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$. Длина волны, при которой это происходит, называется *длиной волны нулевой дисперсии* λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного оптического волокна.

Результирующая дисперсия складывается из волноводной и материальной и называется *хроматической дисперсией*. Дисперсию в ОВ принято характеризовать коэффициентом дисперсии (или удельной дисперсией), измеряемым в пс/(нм·км). Коэффициент дисперсии численно равен увеличению длительности светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения отрезка ОВ длиной 1 км. Значение коэффициента хроматической дисперсии определяется как $CD(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$.

При допущениях (например, изотропности и чистоты материала), опирающихся на исследования, которые исходят из результатов опытов различных веществ, из (2.10) может быть получена приближенная формула зависимости показателя преломления от длины волны

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots, \quad (2.12)$$

где a , b и c — постоянные, значения которых определяются экспериментально для каждого вещества.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного ОВ для расчета дисперсии применима эмпирическая формула Селмейера [5]

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}, \quad (2.13)$$

где A , B , C — подгоночные коэффициенты, определяемые для каждого материала ОВ экспериментальным путем. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле [5]

$$CD(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = \frac{S_0(\lambda - \lambda_0^4)}{\lambda^3}, \quad (2.14)$$

где $\lambda_0 = \left(\frac{C}{B}\right)^{1/4}$ — длина волны нулевой дисперсии;

$S_0 = 8B$ — наклон нулевой дисперсии (размерность пс/(нм²·км));

λ — рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda)\Delta\lambda L. \quad (2.15)$$

Уменьшение хроматической дисперсии достигается применением более когерентных источников излучения, например, лазерных передатчиков, и использованием рабочей длины волны, более близкой к длине волны нулевой дисперсии.

2.3. Распространение световых импульсов в среде с дисперсией

Электрическое поле линейно поляризованного светового сигнала, распространяющегося в одномодовом волокне, можно описать уравнением [6]

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{e}(u(x, y)E(z, t)e^{j(\beta z - \omega t)}), \quad (2.16)$$

где \vec{e} — единичный вектор;

$E(z, t)$ — медленно меняющаяся амплитуда (огибающая) светового импульса, представляющая собой комплексный скаляр, который изменяется в направлении z и во времени t ;

$u(x, y)$ — распределение амплитуды поля в поперечном направлении;

$\beta = \beta(\omega)$ — постоянная распространения;

ω — угловая частота.

Распределение амплитуды поля основной моды в поперечном направлении описывается уравнением [6]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\varepsilon(\omega, x, y) \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - \beta^2 \right) \cdot u = 0, \quad (2.17)$$

где $\varepsilon(\omega)$ — диэлектрическая проницаемость среды.

В отсутствие в ОВ нелинейных явлений рассчитать изменение формы светового импульса в процессе распространения вдоль волокна можно, воспользовавшись преобразованием Фурье [6].

Рассмотрим распространение спектральных компонент светового сигнала $E(z, \omega - \omega_0)$, получаемых преобразованием Фурье огибающей светового импульса $E(z, t)$

$$E(z, \omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(z, t) e^{j(\omega - \omega_0)t} dt, \quad (2.18)$$

где ω_0 — несущая частота.

Спектральные компоненты удовлетворяют уравнению

$$\frac{\partial E(z, \omega - \omega_0)}{\partial z} = j(\beta(\omega) - \beta_0)E(z, \omega - \omega_0) - \alpha, \quad (2.19)$$

где α — коэффициент затухания сигнала $\beta_0 = \beta(\omega_0)$.

Решение этого уравнения известно, оно характеризует затухание сигнала и сдвиг фаз, пропорциональный пройденному расстоянию

$$E(z, \omega - \omega_0) = E_{\text{вх}}(\omega) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z) dz\right) \exp\left(j \int_0^z \beta(z, \omega) - \beta_0 dz\right), \quad (2.20)$$

где Фурье-образ входного светового сигнала имеет вид

$$E_{\text{вх}}(\omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(0, t) e^{j\omega t} dt. \quad (2.21)$$

Для однородного волокна выражение упрощается.

$$E(z, \omega - \omega_0) = E_{\text{вх}}(\omega) e^{-\alpha z} e^{j(\beta - \beta_0)z}. \quad (2.22)$$

Как следует из выражения (2.22), в процессе распространения по волокну разные спектральные компоненты приобретают различный фазовый сдвиг, поэтому Фурье-образ выходного сигнала, прошедшего участок однородного ОВ длиной L , имеет вид

$$E_{\text{вых}}(\omega) = E_{\text{вх}}(\omega)e^{j(\beta-\beta_0)L}e^{-\alpha L}. \quad (2.23)$$

Форма выходного сигнала может быть получена из Фурье-образа обратным преобразованием Фурье

$$E_{\text{вых}}(t) = E(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{вых}}(\omega - \omega_0)e^{-j\omega t} d\omega. \quad (2.24)$$

Искажение световых импульсов при распространении в ОВ можно оценить, разложив постоянную распространения $\beta(\omega)$ в ряд Тейлора около несущей частоты ω_0 [6]

$$\beta(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \beta_n (\omega - \omega_0)^n, \quad (2.25)$$

где

$$\beta_n = \frac{\partial^n \beta}{\partial \omega^n \omega_0}. \quad (2.26)$$

Выражение (2.25), ограниченное первыми четырьмя членами разложения, имеет вид

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3. \quad (2.27)$$

Если в разложении (2.27) пренебречь степенями выше первой, что соответствует распространению светового импульса по ОВ без искажений, то после подстановки (2.27) в (2.23), (2.24) получаем:

$$E_{\text{вых}}(t) = E(L, t) = \frac{1}{2\pi} e^{-\alpha L} \int_0^L E_{\text{вх}}(\omega - \omega_0)e^{-j\beta_1 L + j\omega t} d\omega. \quad (2.28)$$

Сделав замену переменных $T = t - \beta_1 L$, имеем $E_{\text{вых}}(T) = E_{\text{вх}}(t)e^{-\alpha L}$.

То есть в рассмотренном приближении световой импульс затухает, форма его не меняется, а на выходе из волокна он оказывается с вре-

менной задержкой $\beta_1 L$. Следовательно, групповая скорость распространения светового импульса равна $\frac{1}{\beta_1}$.

Обычно коэффициент при квадрате разности частот не равен нулю, в этом случае световой импульс искажается. Для такого импульса произвольной формы получить аналитическое выражение не удастся, но если он имеет гауссовую форму $E_{\text{вх}}(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right)$, аналитическое выражение для выходного импульса представлено в виде

$$E_{\text{вых}}(T) = e^{-\alpha L} \frac{T_0^2}{T_0^2 - j\beta_2 L} \exp\left(\frac{-T^2}{2T_0^2 - j\beta_2 L}\right), \quad (2.29)$$

где T_0 — начальная длительность импульса.

Таким образом, гауссовский импульс сохраняет свою форму, но его длительность T_1 увеличивается [7]

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{z}{T_0^2 / |\beta_2|}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.30)$$

где величина $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ называется *дисперсионной длиной*. Выражение (2.30) показывает, что при $\beta_2 \neq 0$ импульс расширяется. Темп расширения импульса определяется дисперсионной длиной L_D . При определенной длине световода более короткий импульс уширяется больше, так как его дисперсионная длина меньше.

При $z = L_D$ гауссовский импульс уширяется в $\sqrt{2}$ раз. Импульс, сначала не имевший частотной модуляции, приобретает ее по мере распространения в ОВ.

Из выражения (2.30) следует, что уширение гауссовского импульса, не обладавшего на входе частотной модуляцией, не зависит от знака параметра дисперсии β_2 . Поведение изменяется, если импульс на входе имеет некоторую частотную модуляцию. В случае, если для такого импульса она линейна, то амплитуда огибающей записывается в виде [6]

$$E_{\text{вх}}(T) = E_{\text{вх}}(0) \exp\left(-\frac{(1+jC)T^2}{2T_0^2}\right), \quad (2.31)$$

где C — параметр модуляции.

Полуширина спектра (на уровне интенсивности $1/e$ от максимальной) определяется выражением:

$$\Delta\omega = \left(\frac{(1+C^2)^{\frac{1}{2}}}{T_0}\right), \quad (2.32)$$

что в $(1+C^2)^{\frac{1}{2}}$ раз больше, чем ширина спектра импульса той же длительности, но без частотной модуляции. Квазимонохроматический импульс без частотной модуляции имеет минимальную длительность, достижимую при заданном спектре. Поэтому световые импульсы без частотной модуляции называются *спектрально ограниченными* [7].

Форма прошедшего через оптическое волокно светового импульса с линейной частотной модуляцией имеет вид

$$E_{\text{вых}}(T) = e^{-\alpha L} \frac{T_0^2}{T_0^2 - j\beta_2 L(1+jC)} \exp\left(-\frac{(1+jC)T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 L(1+jC))}\right). \quad (2.33)$$

Таким образом, частотно-модулированный (чирпированный) гауссовский импульс сохраняет свою форму при распространении. Длительность импульса T_1 на выходе волокна связана с длительностью на входе соотношением

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\left(1 + \frac{C\beta_2 L}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0^2}\right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.34)$$

Из выражения (2.34) следует, что уширение зависит от знаков параметра β_2 и параметра C частотной модуляции. Гауссовский импульс монотонно расширяется с увеличением расстояния, если $\beta_2 C > 0$.

2.3.1. Физическая природа хроматической дисперсии

Математическое описание эффектов дисперсии в ОВ, проведенное в предыдущем разделе, основано на разложении постоянной распространения $\beta(\omega)$ в ряд Тейлора вблизи несущей частоты ω_0 (2.25), (2.27). Огибающая светового импульса движется с групповой скоростью $u = \frac{1}{\beta_1}$, а параметр β_2 определяет уширение импульса [7].

Параметр β_2 связан с показателем преломления n следующим образом:

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}. \quad (2.35)$$

Показатель преломления вещества определяется двумя параметрами: зависимостью от частоты (длины волны) и волноводными характеристиками волокна. Первый называется *материальной дисперсией*, а второй — *волноводной дисперсией* (см. п. 2.2).

Дисперсию в ОВ, как было сказано выше, принято характеризовать коэффициентом хроматической дисперсии (или удельной хроматической дисперсией) CD . Коэффициенты CD и β_2 связаны соотношением

$$CD = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v} \right) = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \lambda \partial \omega} \approx -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta^2. \quad (2.36)$$

Коэффициент CD можно найти также из известного распределения $n(\lambda)$

$$CD = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2}. \quad (2.37)$$

Коэффициент CD стремится к нулю на длине волны приблизительно равной 1,31 мкм и становится положительным для больших длин

волн. Длина волны, при которой $CD = 0$, называется *длиной волны нулевой дисперсии* λ_{D0} .

В стандартном одномодовом волокне влияние волноводного вклада в дисперсию сводится, в основном, к смещению длины волны нулевой дисперсии λ_{D0} в длинноволновую область, где λ_{D0} и 1,31 мкм. Важной особенностью волноводной дисперсии является то, что ее вклад в CD зависит от параметров ОВ. В общем случае она увеличивается при уменьшении размеров сердцевины. Этот факт может использоваться для смещения длины волны нулевой дисперсии [7].

2.3.2. Влияние хроматической дисперсии на работу систем связи

Развитие современных систем передачи данных неизменно идет по пути наращивания объема и дальности передаваемой информации. Для увеличения объема передаваемой информации необходимо повышать скорость. В настоящее время происходит переход от скорости 2,5 Гбит/с к 10 Гбит/с, а в ближайшей перспективе — к 40 Гбит/с. При передаче информации со столь высокими скоростями приходится учитывать факторы, воздействие которых ранее считалось пренебрежимо малым. К ним относятся хроматическая дисперсия (CD) и поляризационная модовая дисперсия (PMD). В частности, хроматическая дисперсия стандартного одномодового волокна ограничивает дальность безрегенерационной передачи информации даже со скоростью 2,5 Гбит/с всего примерно 300 км на длине волны минимального поглощения в волокне 1550 нм (в системах передачи со скоростью 10 Гбит/с это расстояние сокращается еще примерно в 16 раз). Кроме самого волокна, некоторые другие элементы волоконно-оптических сетей связи являются источниками CD . К таким источникам хроматической дисперсии относятся оптические эрбиевые усилители EDFA, у которых ее величина зависит от уровня накачки [2]. Оценки показывают, что CD , вносимая 30 усилителями, достигает предельно допустимого значения для систем передачи со скоростью 40 Гбит/с.

Хроматическая дисперсия является важным фактором, который следует принимать во внимание при проектировании и строительстве ВОЛС. Ограничения, связанные с ее проявлением, можно уменьшить путем компенсации. Поскольку телекоммуникационное волокно обладает положительной дисперсией, то в линию связи вводят специ-

альный модуль (DCM), содержащий отрезок, обладающий отрицательной дисперсией и компенсирующий дисперсию волокна. Компенсация дисперсии может осуществляться с применением дискретных компонентов, таких как брэгговские дифракционные решетки.

Компенсация хроматической дисперсии ОК в современных системах передачи информации — необходимое условие их качественной и бесперебойной работы. Для реализации эффективной компенсации *CD* обязательным является измерение точных значений хроматической дисперсии всех кабельных участков и других элементов высокоскоростных систем дальней связи.

Хроматическая дисперсия ограничивает максимальную дальность передачи цифровых сигналов без восстановления их первоначальной формы. Для того чтобы охарактеризовать дальность передачи, вводится понятие дисперсионной длины как расстояния, на котором происходит относительное уширение импульса по времени в $\sqrt{2}$ раз. Оценить дисперсионную длину для сигнала с шириной $\Delta\lambda$, можно по формуле [7]

$$L_D = \frac{1}{\beta d \Delta\lambda}. \quad (2.38)$$

Длительность оптического импульса на выходе длинного ОВ зависит от групповой задержки самой медленной спектральной компоненты относительно самой быстрой. Поэтому влияние хроматической дисперсии пропорционально ширине спектра светового сигнала. Именно по этой причине в системах дальней связи используются узкополосные источники излучения — лазеры. Современные лазеры, работающие в непрерывном режиме, являются источниками практически когерентного излучения, ширина полосы излучения которых может составлять единицы килогерц и меньше. Поэтому при использовании в качестве передатчика оптических сигналов таких лазеров с внешней модуляцией ширина спектра светового сигнала определяется ее характером. Ширина спектра ΔV последовательности оптических импульсов цифровой двоичной системы связи в этом случае пропорциональна битовой скорости

$$\Delta V = KB, \quad (2.39)$$

где K — коэффициент пропорциональности, близкий к единице и зависящий от используемого формата модуляции;

B — битовая скорость.

Таким образом, каждый световой импульс сигнала представлен не единственной длиной волны, а их группой в узком спектральном диапазоне — волновым пакетом.

Так как различные длины волн распространяются с разными скоростями (точнее, с разными групповыми скоростями), то входной оптический импульс по мере прохождения по волокну будет становиться все шире. В связи с этим соседние импульсы начинают пространственно перекрываться, нарушая работу цифровой системы передачи информации.

С увеличением длины линии связи и скорости передачи информации влияние хроматической дисперсии возрастает. Действительно, увеличение длины линии приводит к прямо пропорциональному увеличению разности временных задержек спектральных компонент светового сигнала, т.е. к увеличению его длительности. Возрастание скорости передачи информации и, следовательно, сокращение длительности и периода следования несущих информацию импульсов сказываются двояко. Во-первых, допустимая величина хроматической дисперсии линии убывает пропорционально сокращению периода следования $T = (B)^{-1}$ импульсов. Во-вторых, ширина спектра ΔV растет пропорционально битовой скорости B . В результате этого четырехкратное увеличение этой скорости приводит к 16-кратному сокращению предельной допустимой дальности передачи информации.

2.3.3. Методы измерения хроматической дисперсии

Коэффициент хроматической дисперсии CD волокна определяется по разнице в групповой задержке световых сигналов с различными длинами волн $\tau(\lambda)$ в волокне известной длины по формуле [3]

$$CD = \frac{1}{L} \cdot \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda}, \quad (2.40)$$

где L — длина волокна;

λ — длина световой волны.

Различие методов измерения хроматической дисперсии фактически связано с использованием разных методов измерения временных задержек.

В соответствии с рекомендациями ITU-TG.650 существует 3 регламентированных метода измерения дисперсии:

- фазовый (Phase shift technique);
- интерферометрический (Interferometric technique);
- импульсный (Pulse delay technique).

Наиболее распространенным из них является фазовый и его разновидность — дифференциальный фазовый. Эти методы дают наибольшую точность измерений и удобны в практическом плане.

Фазовый метод измерения хроматической дисперсии. Сущность метода: относительная групповая задержка определяется фазовым методом.

Этот метод состоит в сравнении фазы прошедшего через измеряемый световод сигнала с фазой опорного сигнала. Полученные значения сдвига фаз $\varphi(\lambda)$ связаны с групповыми задержками формулой

$$\tau(\lambda) = \frac{\varphi}{(2\pi f)}, \quad (2.41)$$

где f — частота модуляции сигнала.

Измерения задержки должны быть проведены на нескольких длинах волн.

Реализовать измерения можно различными способами, используя:

- несколько источников излучения с фиксированными длинами волн и широкополосный фотоприемник;
- источник с перестраиваемой длиной волны (перестраиваемый лазер или широкополосный источник с селектором длин волн) и широкополосный фотоприемник;
- широкополосный источник и фотоприемник с селектором длин волн.

В случае использования измерителя хроматической дисперсии с перестраиваемой рабочей длиной волны необходимо установить границы спектрального диапазона и шаг изменения длины волны.

Схема фазового метода измерения CD с использованием широкополосного источника излучения и фотоприемника с селектором длин волн представлена на рис. 2.3 [5]. Сигнал с задающего генератора модулирует излучение источника, которое, пройдя по тестируемому волокну, служит измеряемым сигналом, подаваемым на фазометр. Тот же сигнал, поступающий с генератора и подаваемый на фазометр по

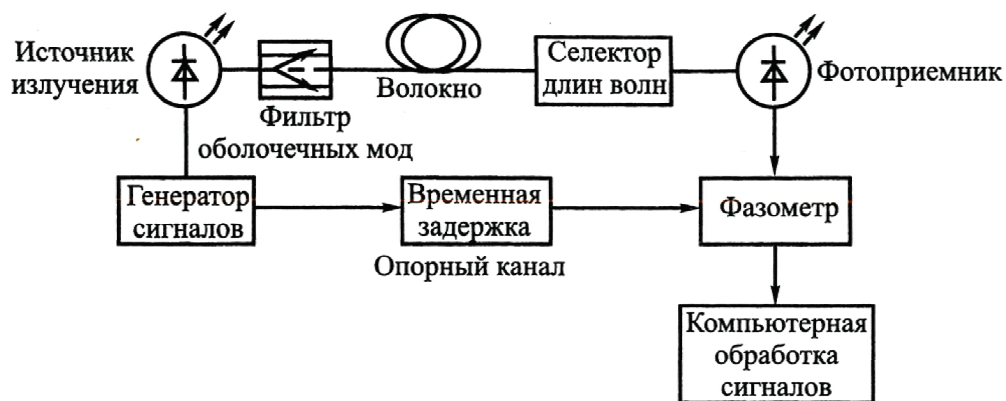


Рис. 2.3. Структурная схема фазового метода измерения CD с использованием широкополосного источника излучения и фотоприемника с селектором длин волн

другому каналу, служит опорным. Фазометр измеряет сдвиг фаз между этими сигналами. Измерения проводятся для каждой из выбранных длин волн. На основании полученных значений по формуле (2.41) рассчитываются величины относительных задержек. Обработка результатов измерения заключается в отыскании аппроксимирующей функциональной зависимости $\tau(\lambda)$. Международные стандарты рекомендуют для каждого типа волокна и спектрального диапазона измерений выбирать эти функции, представляющие собой степенные многочлены, зависящие от длины волны λ с коэффициентами, определяемыми в процессе математической обработки. Широко используются, например, трех- или пятичленные функции Солмейера.

Развитием фазового метода является дифференциальный фазовый метод (Differential Phase Shift method), при котором измеряются относительные фазовые сдвиги и задержки τ_1 и τ_2 двух сигналов на соседних, близких длинах волн λ_1 и λ_2 .

В зависимости от применяемого источника излучения измерения проводятся на группе фиксированных и калиброванных длин волн либо на периодически изменяющихся по длине с небольшим выбранным интервалом в пределах диапазона измерений. В первом случае источником излучения является набор полупроводниковых фотодиодов или лазеров с фиксированными длинами волн, а во втором — перестраиваемый лазер либо широкополосный источник излучения, совмещенный с монохроматором. Применение первой группы излучателей дает существенный выигрыш в скорости измерений и более подходит для полевых условий, а второй — возмож-

ность проводить серии измерений групповых задержек с малым интервалом между длинами волн в выбранном диапазоне.

Групповая задержка $\Delta\tau(\lambda_1)$ сигнала на рабочих длинах волн λ_1 определяется по измеренному значению относительного фазового сдвига $\varphi_1 - \varphi_0$

$$\Delta\tau(\lambda_1) = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{360 f_m} 10^{12}, \quad (2.42)$$

где f_m — частота модуляции, Гц;

$\varphi_1 - \varphi_0$ — фазовый сдвиг, град.

Относительная задержка измеряется в пикосекундах.

Для нахождения величины коэффициента хроматической дисперсии по измеренным значениям относительных задержек на фиксированных длинах волн (не менее пяти длин волн) вычисляются неизвестные коэффициенты в модельной формуле $\Delta\tau(\lambda) = F(\lambda, A, B, C)$, используемой для описания зависимости групповой задержки от длины волны. Заметим, что для оптимального выбора параметров A, B, C можно применять различные математические методы аппроксимации, но чаще используется метод наименьших квадратов.

На основании аппроксимированной зависимости $\Delta\tau(\lambda) = F(\lambda)$ вычисляются хроматическая дисперсия $\frac{d\Delta\tau(\lambda)}{d\lambda}$ и коэффициент хроматической дисперсии

$$D_\lambda = \frac{1}{L} \frac{d\Delta\tau}{d\lambda}. \quad (2.43)$$

Вид функции для описания спектральной зависимости задержки выбирается в соответствии с типом тестируемого волокна. Для стандартного одномодового волокна рекомендуется трехчленная формула Солмейера

$$\tau(\lambda) = A\lambda^2 + B + C\lambda^2. \quad (2.44)$$

Формула в виде квадратного трехчлена применяется для описания волокна со смещенной нулевой дисперсией в случае, когда существенный вклад в хроматическую дисперсию вносит волноводная. Выражение для аппроксимирующей функции в этом случае имеет вид

$$\tau(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + C. \quad (2.45)$$

В отдельных случаях используются и другие выражения для описания функциональной зависимости групповой задержки от длины волны. Например, пятичленная формула Солмейера, имеющая вид

$$\tau(\lambda) = A\lambda^4 + B\lambda^2 + C + D\lambda^{-2} + E\lambda^{-4}. \quad (2.46)$$

Изменение величины групповой задержки при измерениях на соседних длинах волн, разделенных интервалом $\Delta\lambda$, определяется выражением

$$\Delta\tau_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda+\Delta\lambda/2} - \Phi_{\lambda-\Delta\lambda/2}}{360f_m} 10^{12}, \quad (2.47)$$

где λ — центральная длина волны интервала;

Φ — фаза возвращенной модуляции относительно источника электрической модуляции, измеряемая в градусах.

Интерференционный метод измерения хроматической дисперсии. Как уже было сказано, альтернативным методом является интерференционный. Схема измерителя *CD*, использующего данный метод (на основе интерферометра Маха-Цандера), представлена на рис. 2.4 [5]. Излучение от широкополосного источника после селектора длин волн попадает в интерферометр.

При линейном перемещении конца волокна, входящего в состав опорного плеча интерферометра, в опорный канал вносится известная разность оптических длин волн, по величине которой определя-

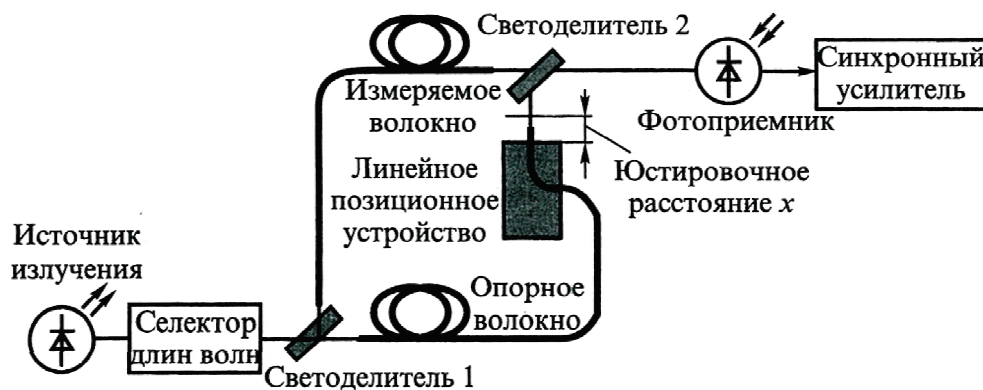


Рис. 2.4. Структурная схема интерференционного метода измерения *CD*

ют групповую задержку светового сигнала в тестируемом волокне, расположенном в измерительном плече. Интерферометрический метод применяется для получения характеристик коротких отрезков волокна длиной в несколько метров и используется в основном в производственном процессе при контроле изготовления волокон и компонентов систем передачи.

Импульсный метод измерения хроматической дисперсии. Стандарт ITU-TG-650 регламентирует метод, основанный на прямом измерении задержки световых импульсов с различными длинами волн при прохождении через волокно заданной длины (time of flight). Этим методом можно проводить измерения времени задержки оптических импульсов лазеров при прохождении выбранного участка волокна туда и обратно, т.е. при отражении от удаленного конца волокна. Точность измерения CD в этом случае ниже, чем фазовым методом, из-за меньшей точности измерения временных задержек.

Схема установки для проведения измерений остается почти такой же, как и при измерении фазовым методом, но вместо фазометра необходимо использовать другое устройство, позволяющее измерять относительную временную задержку двух импульсов.

2.3.4. Аппаратура для измерения хроматической дисперсии

Измерения хроматической дисперсии производятся не только на смонтированных линиях для того чтобы точно компенсировать потери, но и при производстве и разработке компонентов систем передачи, ОВ и ОК, а также в научных целях, поэтому разработаны различные устройства, предназначенные для измерения значений CD . Их технические параметры варьируются в широком диапазоне. Однако сравнение большого количества таких приборов выходит за рамки настоящего пособия, поэтому ограничимся здесь лишь измерителями CD , предназначенными для контроля ВОЛП.

В настоящее время на рынке представлены приборы ведущих производителей измерительной техники, таких как Acterna, Anritsu, EXFO, Luciol, NETTEST, Perkin Elmer.

Сравнительные характеристики приборов приведены в табл. 1.

Приборы, представленные в таблице, условно можно разделить на полевые и стационарные. К первой категории отнесены сравнительно небольшие устройства, имеющие автономное питание наря-

Таблица 1

Технические параметры измерителей хроматической дисперсии

Компания	Actema	Anritsu	EXFO	NETTEST	NETTEST	Perkin Elmer	Perkin Elmer	Luciol	ИИТ
Название прибора	MTS-5000	MW9076D1	FTB-5800	CMA-5000	CMA-5000	FD-440	CHROMOS 11	v-CDI	ИД-2-2
Модель	с модулем 5083 CD		(модуль для FTB-400)	OTDR/CD	CD application				
Тип: полевой или стационарный	полевой	полевой	полевой	полевой	станционный	станционный	станционный	станционный	станционный
Метод измерения	импульсный, регистрируется отраженный сигнал	импульсный, регистрируется отраженный сигнал	фазовый (Phase Shift)	импульсный, регистрируется отраженный сигнал	фазовый (Phase Shift)	дифференциальный фазовый (Differential Phase Shift)	дифференциальный фазовый (Differential Phase Shift)	Импульсный, регистрируется отраженный сигнал	фазовый (Phase Shift)
Тип излучателя, количество, ширина полосы (нм)	4 излучателя	4 излучателя	1530-1625	6 излучателей	1525-1625	1250-1350; 1500-1600 широкополосный светодиод	1525-1575 (C)1569-1620 (L) 1525-1620 (C+L) перестр. лазер	1500-1580; 1510-1630	6 излучателей +1 опорный
Динамический диапазон (дБ или км в SMF)	до 120 км	30	42	38	40	30 (32 и 40 как опция)	до 60	38/42	42

Продолжение табл. 1

Компания	Actema	Anritsu	EXFO	NETTEST	NETTEST	Perkin Elmer	Perkin Elmer	Luciol	ИИТ
Точность установки длины волны (нм)	+/-5	+/-0,5	0,1	—	0,04	+/-0,5	+/-0,1	0,2	—
Точность измерения дисперсии (пс/нм·км)		—	20 км G.652 1,6 120 км G652 20 км ZDSF		+/-1 %или +/-0,05 пс/нм·км	1,5%; +/-0,02 пс/нм	+/-1 %	—	+/-1 %
Воспроизводимость измерений ХД	+/-0,2 пс/(нм·км)	+/-0,05 пс/(нм·км)	20 км 0,04 пс/нм 80 км 0,05 120 км 0,25	—		1,5%	+/-1 %	0,02 пс/ (нм·км)	0,005 пс/ (нм·км)
Воспроизводимость измерений наклона дисперсионной кривой (%)	+/-1	—	0,03 20 км G.652		0,1	1,5	+/-1	—	0,13
Воспроизводимость измерений длины волны нулевой дисперсии	—	+/-0,6 нм	0,1 нм при 20 км G.652; 0,14 нм при 80 км G.652; 1,1 нм при 120 км G.652	+1/-6 нм	+/-0,5 нм	0,5 нм	0,1 нм	0,1 нм (при длине волокна 25 км)	0,5 нм

Окончание табл. 1

Компания	Acterna	Anritsu	EXFO	NETTEST	NETTEST	Perkin El-mer	Perkin El-mer	Luciol	ИИТ
Погрешность измерения наклона кривой в точке нулевой дисперсии, %		—	0,03 при 20 км G.652; 0,05 при 80 км G.652; 0,25 при 120 км G.652		+/-1,5		+/-1		—
Общее время измерения	40 с	короткое	число точек измерения, выраженное в с	4 мин при измерении 50 км	<30 с		30 с (типичное время)	10 с	10 с
Возможность тестирования линий с усилителями	нет	нет	да	нет	нет	нет	да, модель CHROMOS 12	да	да
Габариты (см)	30×23,5×3	29×19,4×12,2	35×33×10,5 (приемник), 36×42×10,5 (источник)	24,1×34,3×9,5 (размеры платформы СМА-5000)	24,1×34,3×15,2 (СМА-5000 с модулями ХД и ПМД)	35×33×10,5 (приемник) 35×42×10,5 (излучатель)	35×42×10,5 два блока	26×9×26,5 (приемник) +12,5×4,8×21 (источник)	29×26×6,5 (два модуля)
Масса (кг)	5,5	5,4	9 — приемник 4 — источник	5,4	около 10	18	18	2,3 — источник 0,8 — приемник	3 — источник 4 — приемник

ду с питанием от сети. Измерение хроматической дисперсии путем прямого измерения задержки распространения коротких световых импульсов фиксированных длин волн (импульсный метод измерений) выполняется прибором V-CD1 швейцарской компании Luciol. Постоянство длины волны источников излучения обеспечивается решетками Брэгга, играющими роль узкополосного (0,1 нм) оптического фильтра. Количество источников может быть произвольным. Погрешность временных измерений составляет 5 пс. Для достижения высокой чувствительности (до 42 дБ) в приборе применяется техника подсчета фотонов с регистрацией сигналов на уровне 100 дБм.

Производителем измерителей хроматической дисперсии на территории СНГ является Институт информационных технологий, Беларусь. В его приборах ИД-2-1 (для кабельных заводов и испытательных лабораторий) и ИД-2-2 (для измерения проложенных линий) применяется фазовый метод с семью источниками излучения для измерения разности фаз синусоидально модулированного сигнала на фиксированных длинах волн. Использование лавинного фотодиода в качестве смесителя высокочастотных сигналов позволяет применить низкочастотный оптический приемник для регистрации разности фаз опорного и сигнального каналов и существенно увеличить отношение сигнал/шум. Последующая цифровая обработка, использующая преобразования Фурье, минимизирует искажения в приемной части устройства [6]. Приборы ИД-2-1 и ИД-2-2 обладают высокими техническими характеристиками, позволяют проводить высокоскоростные измерения, имеют большой динамический диапазон, автономное питание, малый вес и отличаются низкой стоимостью по сравнению с аналогами.

К типичным представителям полевых приборов, предназначенных для измерения CD , следует отнести оптические рефлектометры Anritsu (MW9076D1) и Acterna (MTS-5000e), а также универсальные измерительные платформы CMA-5000 компании Nettest и FTB-400 с модулем FTB-5800 компании EXFO. Особый интерес для операторов связи представляют полевые приборы, построенные на модульной основе — портативные модульные измерительные платформы. В таких платформах используются портативный индустриальный компьютер и многофункциональные сменные блоки, выполняющие рефлектометрию, измерение вносимых потерь и потерь на обратное отражение, спектральные измерения в системах WDM, измерение РМД и CD и т.д. Идеология построения полевых приборов на мо-

дульной основе впервые была компанией EXFO в 1996 г. (FTB-300); в настоящее время наблюдается устойчивая тенденция построения приборов на этом принципе.

Приборы компаний Anritsu (MW9076D1), Acterna (MTS-5000 с модулем 5083 CD) и Nettest (CMA-5000 OTDR/CD) позволяют произвести оценку хроматической дисперсии с использованием излучения лазеров на четырех фиксированных длинах волн: 1310, 1450, 1550 и 1625 нм путем измерения временных интервалов при прохождении световых импульсов через волокно. Несомненными достоинствами этих приборов являются малый вес, высокая скорость измерений и дополнительная возможность измерения рефлектограмм. К недостаткам следует отнести меньшую точность измерения дисперсии, связанную не только с применением всего четырех фиксированных источников излучения, но и с меньшей точностью определения временных задержек импульсным методом по сравнению с фазовым, особенно в участках волокна небольшой длины (несколько км).

Портативная модульная измерительная система компании Nettest CMA-5000, представленная осенью 2002 г., может включать в себя также и модуль измерения хроматической дисперсии, характеристики которого приведены в табл. 1. В нем реализован метод измерения сдвига фаз при перестройке длины волны излучающего лазера.

В полевом приборе компании EXFO применяется тот же метод, причем в качестве опорной длины волны используется выделенная фильтром компонента широкополосного излучения светодиода. Такое решение обеспечивает процесс измерения с использованием одного волокна без обратной связи с источником излучения для спектральной привязки результатов измерения. Поэтому появляется возможность измерения длинных участков волокна с однонаправленными элементами, такими как изоляторы и усилители (до 30 усилителей). В частности, сообщалось об успешном измерении 500-километровой линии связи с восемью усилителями EDFA.

Заметим, что в настоящее время несколько компаний предлагают приборы, построенные по модульному принципу, что позволяет проводить комбинированные измерения *CD* и *PMD* на основе одной платформы в полевых условиях (см. табл. 1). В такой комплектации можно проводить весь комплекс измерений дисперсионных параметров ВОЛП в полевых условиях на базе одного переносного устройства.

В заключение можно сделать вывод, что в современных телекоммуникационных системах измерение и компенсация хроматической дисперсии становятся все более насущной задачей. Большой выбор приборов на рынке измерительной техники позволяет успешно решать эту непростую задачу. Следует отметить, что все основные производители измерительного оборудования, перечисленные выше, представлены в России напрямую либо через российские компании, осуществляющие продажи в рамках дистрибьюторских соглашений.

2.4. Поляризационная модовая дисперсия

Стремительное развитие техники оптической передачи информации в последнее десятилетие привело к тому, что поляризационные эффекты в волоконно-оптических линиях связи, еще недавно считавшиеся незначительными, стали играть роль основного фактора, сдерживающего дальнейшее увеличение ее скорости и дальности. Это связано с тем, что ограничения, накладываемые затуханием световых сигналов и их искажениями из-за хроматической дисперсии, успешно преодолеваются по мере внедрения оптических усилителей, улучшения их характеристик, а также в результате разработки эффективных методов компенсации хроматической дисперсии. По мере увеличения скорости передачи информации по одному каналу до 40 Гбит/с и дальности до нескольких тысяч километров даже слабые эффекты поляризационной модовой дисперсии PMD (polarization mode dispersion), накапливаясь, оказывают заметное влияние на работу системы.

2.4.1. Природа поляризационных эффектов в одномодовом оптическом волокне

Если рассматривать свет как электромагнитную волну, то ее распространение в любой среде описывается уравнениями Максвелла, в которых $\vec{E}(r,t)$ и $\vec{H}(r,t)$ — векторы электрического и магнитного полей, изменяющиеся в пространстве и времени [4], где r обозначает пространственное положение вектора. Более удобно оперировать с преобразованием Фурье этих векторов. Для $\vec{E}(r,t)$ оно представлено формулой (2.20), для $\vec{H}(r,t)$ определяется аналогичным образом.

При действии электрического поля на материал, подобный кварцу, происходит поляризация его атомов. Индуцированная поляризация описывается вектором \vec{P} , который зависит от особенностей среды и приложенного электрического поля и связан с $\vec{E}(r, t)$ и электрической индукцией \vec{D} выражением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (2.48)$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Связь \vec{P} и \vec{E} в оптическом волокне определяется свойствами среды и является причиной дисперсии.

Рассмотрим поведение фундаментальной моды, представив электрическое поле $\vec{E}(r, t)$ световой волны в виде

$$\vec{E}(r, t) = \tilde{E}_x \vec{e}_x + \tilde{E}_y \vec{e}_y + \tilde{E}_z \vec{e}_z, \quad (2.49)$$

где \vec{e}_x, \vec{e}_y и \vec{e}_z — соответствующие выбранным осям единичные векторы, причем z — направление распространения света.

Данное уравнение имеет два линейно независимых решения, которые соответствуют фундаментальной моде.

Изменяющееся со временем электрическое поле считается *линейно поляризованным*, если его направление остается постоянным во времени. Если оно не имеет продольной компоненты, то считается *поперечным*, в противном случае — *продольным*. Два линейно независимых решения волнового уравнения описывают линейно поляризованные вдоль осей x и y электрические поля, которые в силу взаимной перпендикулярности называются *ортогонально поляризованными составляющими* электрического поля или состояниями поляризации SOP (State of Polarization). Любая линейная комбинация этих двух составляющих также является решением уравнения и, следовательно, фундаментальной модой. В идеальном изотропном ОВ оба состояния поляризации имеют одну и ту же постоянную распространения, т.е. одинаковую скорость, поэтому при прохождении такой среды длительность результирующего импульса остается неизменной. В реальных ОВ из-за нарушения круговой симметрии воз-

никает небольшая анизотропия, поэтому, учитывая распределение световой энергии между SOP, различие констант распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе ОВ.

Анизотропия или двулучепреломление оптического волокна могут быть связаны с нарушением идеальной цилиндрической формы сердцевинки либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале ОВ, как это показано на рис. 2.5, или обусловлены несовпадением геометрических центров сердцевинки и оболочки.

Нарушение круговой симметрии приводит к появлению анизотропии, при этом в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

Скорости распространения поляризационных компонент светового импульса различны, что приводит к возникновению временной задержки $\Delta\tau$, которую принято называть *дифференциальной групповой задержкой* DGD (Differential Group Delay), приводящей к уширению результирующего сигнала. Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются *быстрым и медленным главными состояниями поляризации* PSP (Principal State of Polarization). Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются *быстрой и медленной осями анизотропной среды*. Различие в скоростях приводит к отставанию импульса, поляризованного вдоль медленной оси PSP (рис. 2.6), от им-

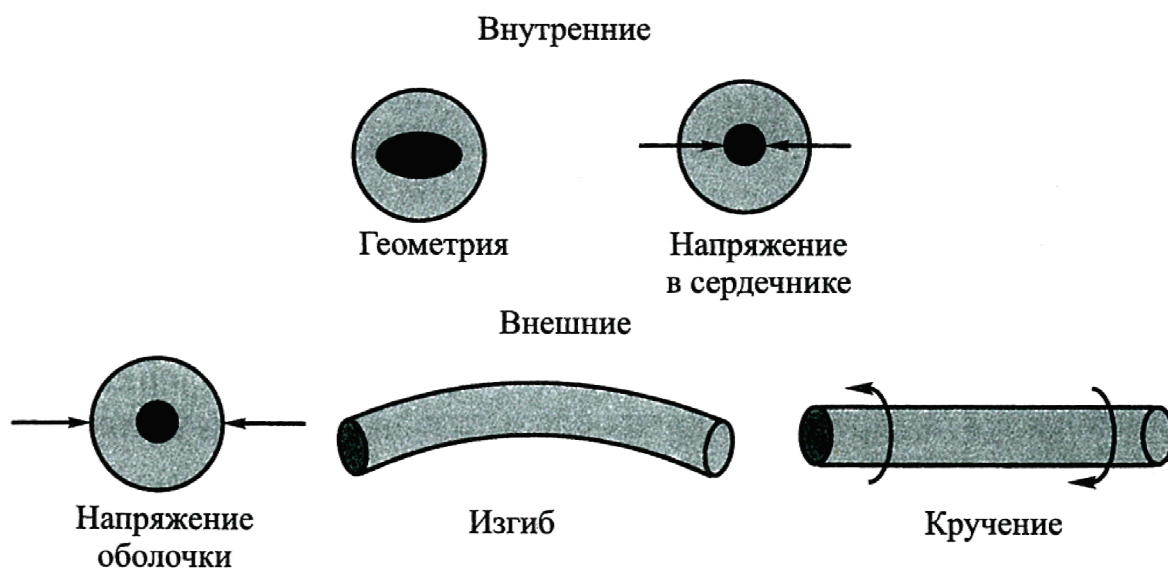


Рис. 2.5. Причины возникновения анизотропии оптического волокна

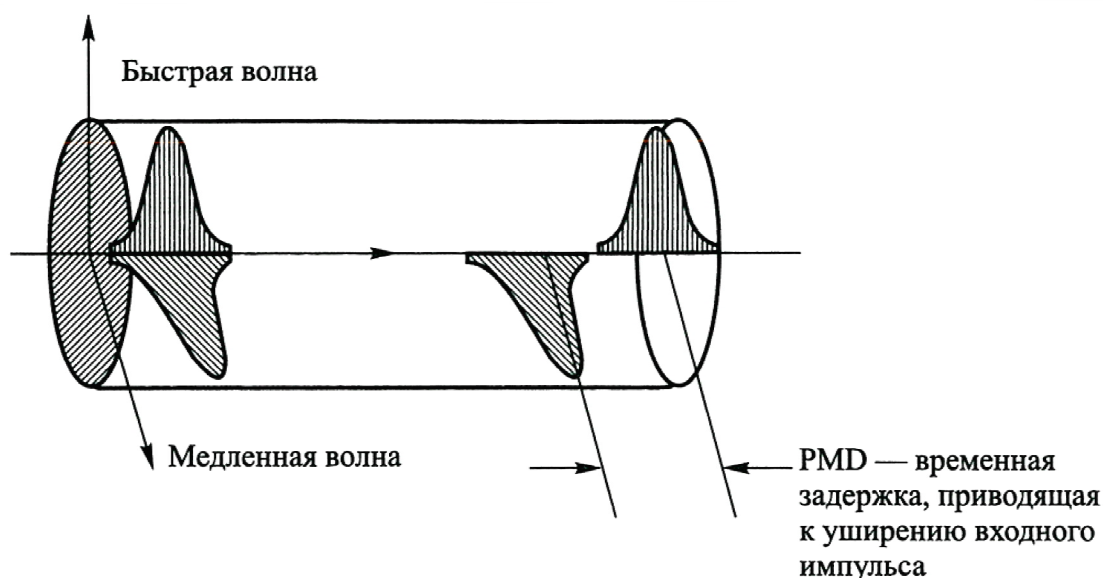


Рис. 2.6. Появление PMD при распространении световых импульсов в оптическом волокне

пульса, поляризованного вдоль быстрой оси PSP, на величину относительной задержки $\Delta\tau$.

Возникновение DGD вызывает ряд искажений информационного сигнала, включая увеличение длительности импульса. Но в отличие от хроматической дисперсии PMD не является стабильной, а имеет статистическую природу. Существует несколько факторов, приводящих к росту анизотропии профиля ОВ:

- статические:
 - несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
 - скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
 - изгибы ВОК и, как следствие, механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля;
- динамические:
 - вариации температуры окружающей среды для ВОК, проложенных в грунт;
 - динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие промерзания) для подвесных ВОК.

Из-за наличия динамических факторов даже в пределах отдельного сегмента волокна невозможно определить направление поляризации сигнала после прохождения этого сегмента, а тем более —

пропорцию, в которой распределится энергия между PSP на следующем участке волокна. Поэтому задержку $\Delta\tau$ приходится рассматривать как случайную во времени величину. Детальный анализ динамического поведения DGD показывает, что она наилучшим образом описывается распределением Максвелла, а среднеквадратичное отклонение $(\Delta\tau^2)$ связано со средним значением дифференциальной групповой задержки соотношением [5]

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \frac{3\pi}{8} \langle \Delta\tau \rangle_{Max}^2, \quad (2.50)$$

где индекс *Max* обозначает усреднение по функции распределения Максвелла.

Поляризационной модовой дисперсией PMD называют среднеквадратичное значение дифференциальной групповой задержки

$$\tau_{PMD} = \sqrt{\langle \Delta\tau^2 \rangle}, \quad (2.51)$$

обычно измеряемой в пс.

В линии с большим числом сегментов значение PMD определяется в зависимости от суммарного расстояния по формуле [3]

$$\tau_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L}, \quad (2.52)$$

где L — протяженность оптической линии связи (км),

D_{PMD} — коэффициент PMD оптического волокна (пс/км^{1/2}).

Значение коэффициента D_{PMD} для типичных ОВ находится в пределах от 0,1 до 2 пс/км^{1/2}. В табл. 2 для них при разных скоростях цифровой передачи приведены значения максимальной протяженности линии связи.

Таблица 2

Значения максимальной протяженности волоконно-оптической линии связи

Скорость цифровой передачи	(пс/км ^{1/2})	0,1	0,5	2,0
$V = 2,5$ Гбит/с	L (км)	160 000	6 400	400
$V = 10$ Гбит/с	L (км)	10 000	400	25
$V = 40$ Гбит/с	L (км)	625	25	1,56

Задержка световой волны, поляризованной вдоль медленной оси, относительно волны, поляризованной вдоль быстрой оси, приводит

к появлению разности фаз $\Delta\varphi$ между двумя поляризационными компонентами, прямо пропорциональной $\Delta\tau$ и угловой частоте со световой волны

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_f = \omega\Delta\tau, \quad (2.53)$$

где φ_s — фаза горизонтально-поляризованной волны;

φ_f — фаза вертикально-поляризованной волны.

Линейная зависимость разности фаз двух поляризационных компонент приводит к тому, что степень зависимости поляризации выходного излучения от частоты описывается периодической функцией.

2.4.2. Методы измерения PMD

На высоких частотах измерять дисперсию в режиме реального времени бесполезно, однако существуют принципиально отличающиеся волновая (частотная) и временная методики определения параметра PMD, заключающиеся в измерении PMD по средней дифференциальной групповой задержке и среднеквадратичному отклонению интервалов времени [5]. Первая методика основана на поиске экстремальных точек посредством измерений поляризации и определяет $\Delta\tau$, исходя из анализа эволюции выходного состояния поляризации по мере изменения длины волны, анализа собственных значений матриц Джонса на интервалах длин волн, по скорости вращения выходного состояния поляризации вокруг оси основных состояний на сфере Пуанкаре.

Вторая методика основана на преобразовании Фурье при интерферометрических измерениях и определяет временную задержку, исходя из интерферограммы, получаемой путем помещения измеряемого устройства в интерферометр с низкой когерентностью.

Известны также методы измерения PMD по смещению фазы и задержке импульса, в которых $\Delta\tau$ определяется, соответственно, исходя из измерения фазы огибающей модулированного по интенсивности сигнала и интервала времени между импульсами двух основных состояний поляризации. Метод коррекции кривой полосы частот основан на использовании математической модели, в которой с целью определения $\Delta\tau$ кривая подгоняется до микроволновой амплитудной модуляции волокна.

Здесь мы рассмотрим три основных метода, используемых в современных измерителях PMD, учитывая, что метод сферы Пуанкаре, или, как его иногда называют, метод SOP (состояния поляризации), в измерительных телекоммуникационных лабораториях вряд ли будет использоваться из-за ограниченного применения поляриметров.

2.4.3. Волновые методы измерения PMD

К волновым методам измерения PMD относятся методы сканирования длины волны, матрицы Джонса и дуги Пуанкаре, которые позволяют извлечь информацию из изменения состояния поляризации на выходе тестируемого устройства по мере изменения длины входной световой волны [5]. Рассмотрим метод сканирования длины волны.

Метод сканирования длины волны. В данном методе [3] для измерения PMD среднее значение дифференциальной групповой задержки определяется статистически, исходя из количества максимальных и минимальных значений мощности на выходе анализатора по мере сканирования длины волны.

Хотя отклонение выходной поляризации в случае использования волокна с произвольно связанными модами является неустойчивым на любой длине волны, существует два основных состояния поляризации, при небольших отклонениях от которых выходная поляризация будет изменяться в достаточно малом интервале длины волны. На этом основано несколько альтернативных модификаций метода сканирования длины волны, схемы которых приведены на рис. 2.7.

Эти схемы отличаются типом источника излучения, а также используемыми средствами определения ширины спектра и настройки длины волны. Для обеспечения адекватного определения характеристик спектральное разрешение схемы должно удовлетворять условию:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{\lambda}{8\nu\Delta\tau}, \quad (2.54)$$

где $\Delta\lambda$ — спектральная ширина источника, или разрешение полосы пропускания приемника, м;

λ — номинальная длина волны измерения, м;

ν — оптическая частота, Гц;

$\Delta\tau$ — дифференциальная групповая задержка тестируемого устройства, с.



Схема измерения PMD анализатором оптического спектра

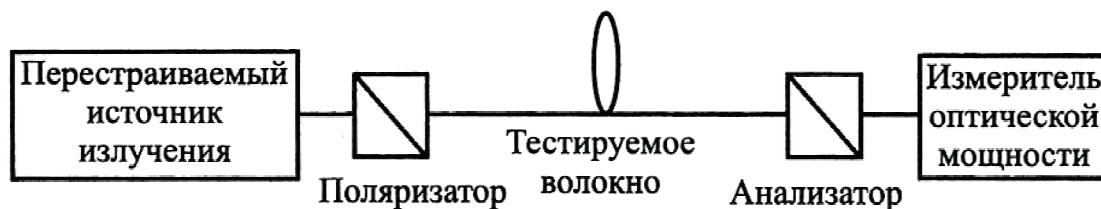


Схема измерения PMD измерителем мощности

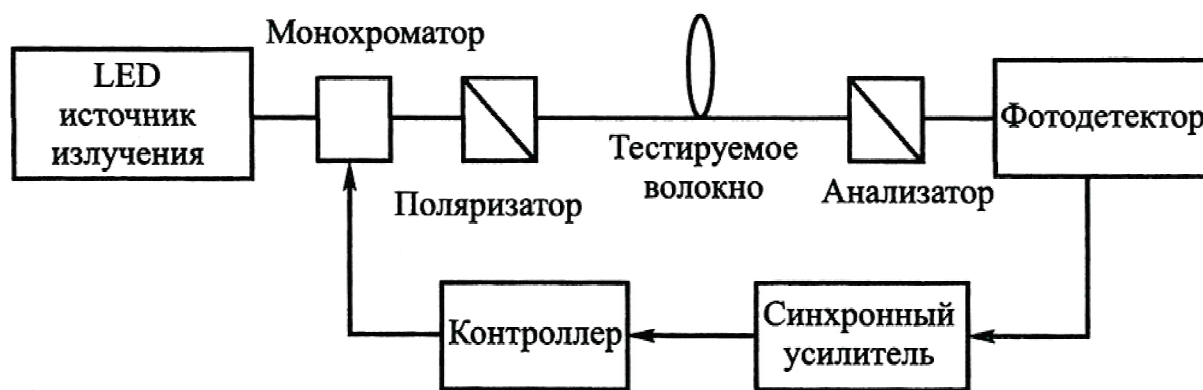
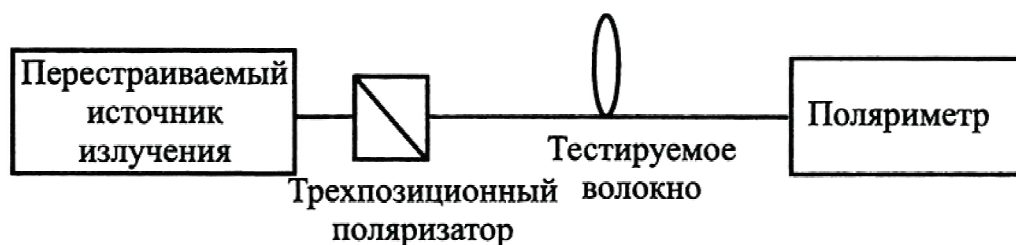


Схема измерения PMD монохроматором

Рис. 2.7. Основные схемы измерения PMD волновым методом

В области 1550 нм требование по спектральному разрешению сводится к выполнению условия

$$\Delta\lambda < \frac{1}{\Delta\tau}, \quad (2.55)$$

где длина измеряется в нм, а время — в пс.

Согласно данному методу, результаты измерений накапливаются во время сканирования или пошаговых изменений длины волны источника (или приемника, в зависимости от схемы измерения).

2.4.4. Временные методы измерения PMD

В настоящее время известен ряд методов измерений PMD во временной области [5], к которым относятся интерферометрический метод и методы измерения по смещению фазы и задержке импульса. В последних дисперсия определяется, исходя из измерения фазы огибающей модулированного по интенсивности сигнала и интервала времени между импульсами двух основных состояний поляризации соответственно.

Интерферометрический метод измерения PMD [3] основан на измерении автокорреляции электрического поля световой волны или взаимной когерентности двух сигналов, излучаемых одним широкополосным источником. Как и в методах задержки импульса и дифференциального смещения фазы, здесь осуществляется прямое измерение временной задержки. На рис. 2.8 показана схема измерения PMD с использованием интерферометра Майкельсона и установленными на выходе источника оптического излучения поляризатором и анализатором — на входе фотодиода.

В рассматриваемой схеме лучи интерферометра ортогонально поляризованы, а время перемещения зеркала создает задержку между ними, в то время как анализатор обеспечивает взаимное объединение выходных собственных мод тестируемого устройства на фотодиоде.

Интерферометрический метод применим к оптическим компонентам, как с вырожденными модами, так и к оптическому волокну со связанными модами, где основные состояния поляризации являются функциями длины волны, причем получаемые в результате изме-

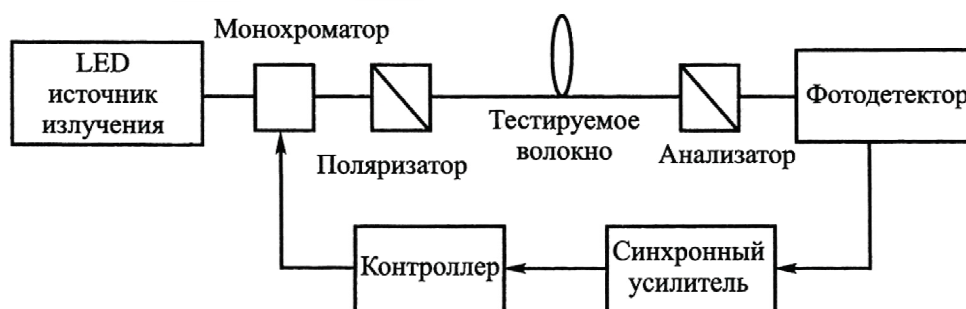


Рис. 2.8. Обобщенная схема измерения PMD временным методом

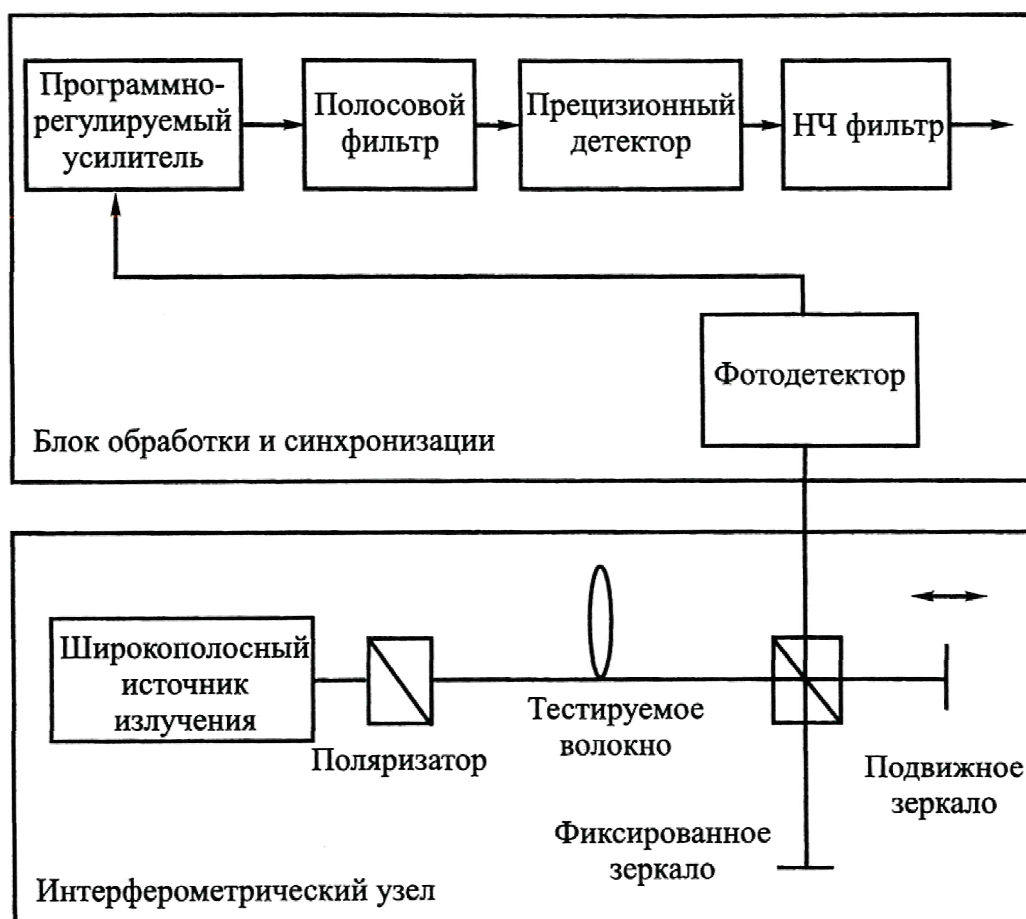


Рис. 2.9. Схема реализации измерений PMD интерферометрическим методом

рения интерферограммы имеют существенные различия. На рис. 2.9 [5] приведена схема поляризационной модовой дисперсии.

Интерферометрический метод характеризуется следующими особенностями:

- измерение больших значений PMD требует пропорционального смещения подвижного зеркала;
- когерентность источника должна быть меньше, чем измеряемая задержка и, следовательно, ширина спектра источника должна быть большой;
- измерение осуществляется быстро и не зависит от вибрации волокна;
- идеален для полевых условий из-за отсутствия связи между входом и выходом волокна;
- измерение осуществляется в широком динамическом диапазоне;
- показания зависят от состояния поляризации на входе объекта измерения.

У некоторых приборов диапазон измерения PMD составляет 30 пс с возможностью расширения до 100 пс. Динамический диапазон составляет 40 дБ, что выше, чем у большинства других приборов, используемых в интерферометрических технологиях и ограничивающих обычно длину тестируемого волокна. Некоторые из наиболее совершенных PMD устройств имеют среднее время измерения ниже 15 с и функцию автоматического подсчета PMD.

2.5. Контроль PMD в процессе эксплуатации ВОСП

При прокладке кабеля многие параметры, в том числе и PMD, могут по ряду причин (деформация волокна, температурные изменения, натяжение и т.д.) отклониться от паспортных данных, поэтому требуется дополнительное проведение ее измерений. В процессе эксплуатации также следует проводить регулярные проверки параметра PMD. Для сложных линий с большим числом последовательных сегментов ВОК проводится тестирование PMD и отдельных сегментов. Если линия состоит из ТУ предполагаемых независимыми сегментов ВОК с дисперсией D_{PMD} результирующая поляризационная модовая дисперсия может быть получена в соответствии с законом распределения суммы независимых случайных величин [5].

Для характеристики верхнего статистического предела, характеризующего PMD системы, целесообразно ввести PMD *протяженной системы*:

$$D_{\text{PMD}}^2 = D_{\text{PMD1}}^2 + D_{\text{PMD2}}^2 + \dots + D_{\text{PMDn}}^2. \quad (2.56)$$

Рассмотрим простой пример. Пусть линия состоит из 9 сегментов, 8 из которых имеют $D_{\text{PMD}} = 0,2 \text{ пс/км}^{1/2}$, последний $D_{\text{PMD}} = 2,0 \text{ пс/км}^{1/2}$. Результирующая D_{PMD} такой линии равна $2,078 \text{ пс/км}^{1/2}$. Если все 9 сегментов имеют $D_{\text{PMD}} = 0,2 \text{ пс/км}^{1/2}$, то результирующая D_{PMD} равна $0,6 \text{ пс/км}^{1/2}$. Это означает необходимость тестирования всех сегментов, чтобы исключить возможность резкого влияния низких характеристик любого из них на линию в целом [4].

2.6. Выводы

В данной главе были рассмотрены методы измерения межмодовой, хроматической и поляризационной модовой дисперсии, из которых в современных магистральных ВОСП применяются последние два вида дисперсии, а первый используется применительно к локальным сетям связи.

Измерение результирующей хроматической дисперсии линии передачи дает очень важную информацию для проектирования и построения высокоскоростных систем, осуществляющих передачу данных на большие расстояния. В первую очередь это связано с тем, что система, как правило, состоит из множества волокон разных производителей, с собственными коэффициентами дисперсии и длинами волн нулевой дисперсии. Поэтому дисперсия одноканальной системы с последовательным соединением волокон, характеризующихся различной дисперсией, может свести общую дисперсию к нулю. В другом случае дисперсия может накапливаться вдоль линии и затем компенсироваться на выходе системы. Например, если установленная волоконно-оптическая система со смещенной дисперсией имеет нулевую дисперсию на выбранной рабочей длине волны, она может быть скомпенсирована при помощи относительно короткого волокна с несмещенной дисперсией, которое имеет большой положительный коэффициент дисперсии при 550 нм. Компенсация возможна и при помощи дифракционной решетки Брэгга [6].

В системах WDM-уплотнения компенсация дисперсии представляет более сложную задачу, так как мощность EDFA-усилителей достаточна для того, чтобы создавать нелинейные эффекты в одномодовом волокне. Поэтому второй целью компенсации хроматической дисперсии является ограничение искажений, вызванных этими нелинейными явлениями с помощью включения отрезков оптических волокон с отрицательной дисперсией или расположением каналов в нервных по ширине интервалах длин волн.

Таким образом, в высокоскоростных системах передачи данных на большие расстояния хроматическая дисперсия должна тщательно измеряться, а затем компенсироваться с целью минимизации уширения импульса. В то же время ее значение должно поддерживаться на некотором небольшом, но отличном от нуля уровне в тех случаях, где оптическая мощность велика.

Измерения хроматической дисперсии проводятся в процессе исследований, испытаний, в производстве ОВ и ОК, а также при сооружении ВОЛП. Более того, они проводятся при производстве и входном контроле системных компонентов, особенно компенсаторов хроматической дисперсии и мультиплексоров по длине волны. В полевых условиях хроматическая дисперсия измеряется при запуске новых систем или модернизаций существующих каналов с целью повышения их скорости. Некоторые системы измерения требуют локального доступа к обоим концам тестируемого волокна, в том числе и тогда, когда оно установлено.

Величина PMD существенно влияет на высокоскоростные параметры коммуникационных сетей, таких как SONET и STM, и должна измеряться не только по изготовлении их, но и после прокладки кабелей и монтажа, так как механические изгибы и давление могут вызвать двойное лучепреломление и привести к изменению PMD. С использованием EDFA мультиплексорные секции и регенерационные участки увеличиваются, и все источники дисперсии, включая PMD, должны контролироваться, чтобы свести их до минимума, ибо в противном случае эффект от усиления будет сведен на нет ограничением частоты модуляции.

Глава 3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО НАТЯЖЕНИЯ УДЛИНЕНИЯ

3.1. Влияние продольных деформаций (натяжения) на работу систем связи

Величина продольного напряжения (удлинения) оптического волокна (ОВ) в оптическом кабеле (ОК) является важным параметром, который необходимо учитывать при его производстве, прокладке и эксплуатации. Длительное воздействие нагрузки вызывает микроразрушения и может привести к обрыву ОВ. Некоторые конструкции ОК или процессы их производства могут привести к возникновению статических напряжений в ОВ. Во время прокладки ОК подвергается значительным нагрузкам, передающимся на ОВ и приводящим к его растяжению. Это напряжение, например, может возникнуть также из-за провисания ОК, проложенного по опорам контактных сетей и высоковольтным сигнальным линиям автоблокировки. Деформации на растяжение, приводящие к напряжению ОВ, не должны превышать безопасных пределов (на примере табл. 3).

Таблица 3

Максимально допустимые нагрузки для ОВ производства компании Corning [1]

Продолжительность нагрузки	Безопасно допустимое напряжение, %
40 лет	0,19
4 ч.	0,32
1 с	0,48

Надежность ОК и их стойкость к указанным деформациям проверяются при разработке, производстве и сертификации новых конструкций кабелей. Особое внимание должно уделяться повышению точности измерения удлинения ОВ. Далее будут рассмотрены метод, оборудование и результаты таких испытаний оптических кабелей.

3.2. Контроль надежности оптических кабелей. Бриллюэновский сигнал

Важным достоинством волоконно-оптических линий связи является их потенциальная долговечность — изделия из стекла сохраняются столетиями. Для обеспечения долголетней работы необходимы соответствующие условия и главное из них — отсутствие механических напряжений. Дело в том, что срок службы ОВ определяется процессом возникновения в них микроскопических трещин. Центры роста таких трещин всегда присутствуют на поверхности стекла, но могут как развиваться, так и нет. Однако если волокно растянуто, то трещина начинает лавинообразно расти, приводя к его разрыву. Характер зависимости срока службы волокна от его натяжения представлен на рис. 3.1 (данные японской фирмы FUJIKURA для стандартного телекоммуникационного одномодового волокна), где натяжение выражено в единицах продольного удлинения. Между левой линией, соответствующей длине волокна 10 000 км, и правой — 1 км — могут располагаться практически любые длины применяемых волокон. Выделяют три диапазона напряжений: безопасные — до 0,3 %, недопустимые — более 0,6 % и промежуточные, требующие дополнительного анализа.

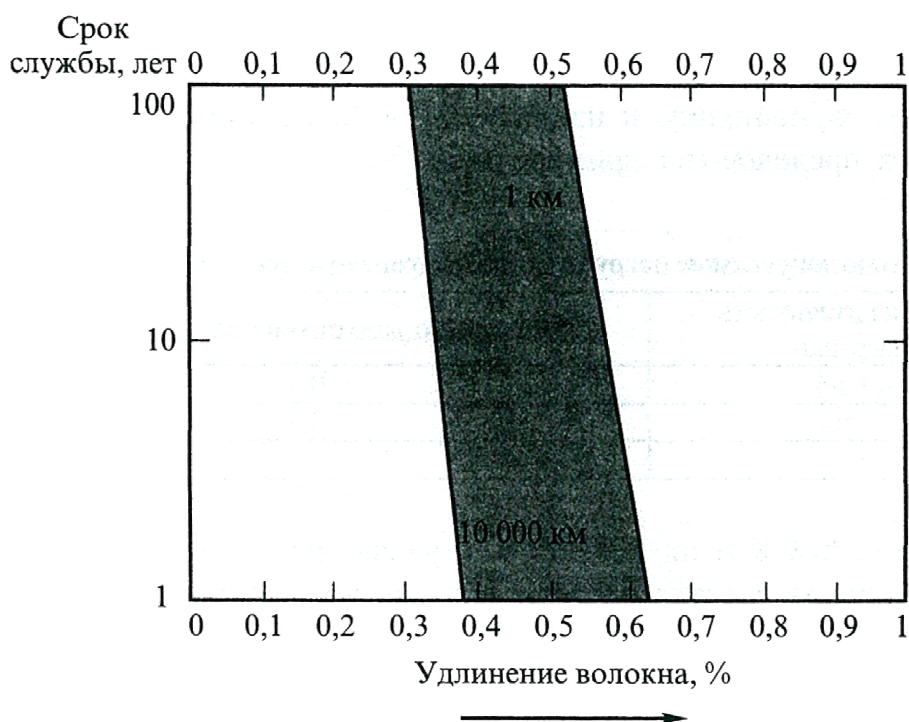


Рис. 3.1. Характер зависимости срока службы волокна от его натяжения

Хотя в приведенных оценках не учитывался ряд факторов, таких как микрповреждения волокна или влияние влаги, из графика видно, что незначительное увеличение натяжения ОВ может приводить к многократному уменьшению его срока службы. Поэтому надежность волоконно-оптических линий связи нельзя оценить без достоверной информации о натяжении волокна в кабеле. Эта задача стимулировала исследования тонких оптических эффектов в волокне, в результате чего возникла бриллюэновская рефлектометрия. Известно, что при распространении излучения вдоль ОВ оно рассеивается на оптических неоднородностях, большая часть — на микроскопических изменениях плотности плавленого кварцевого стекла. Такое рассеяние называется *рэлеевским*. На этом явлении основан принцип действия обычных рефлектометров, нашедших широкое применение.

Другой вид неоднородностей, имеющих в волокне, обусловлен тепловыми колебаниями атомов. Так, подобно инфракрасному тепловому электромагнитному излучению, в стекле всегда присутствуют гиперзвуковые волны. Рассеяние света на вызванных этими волнами подвижных неоднородностях показателя преломления и называется *бриллюэновским*, главным образом отличающимся от рэлеевского тем, что вызывающие его неоднородности движутся. В этом случае вследствие эффекта Доплера оптическая частота рассеянного сигнала будет отличаться от частоты лазера и, как следствие, от частоты рэлеевского рассеяния (рис. 3.2). Более того, бриллюэновский сдвиг частот $\Delta\nu_B$ пропорционален скорости звука и зави-

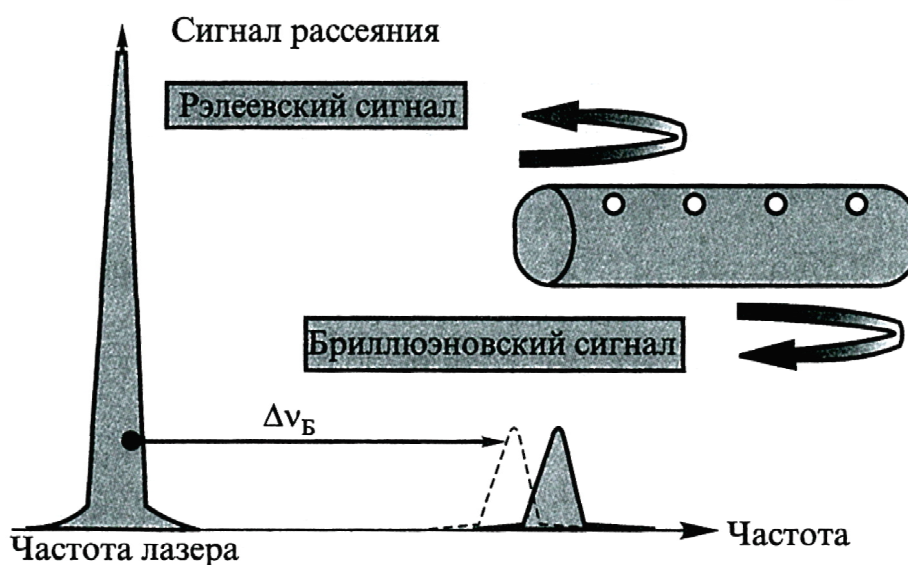


Рис. 3.2. Бриллюэновское рассеяние

сит от натяжения волокна, подобно тому, как натяжение струны меняет ее тон. Поэтому, измерив распределение величины Du_6 вдоль волокна, можно получить картину напряжений в нем. Соответствующий прибор должен совмещать возможности рефлектометра и оптического спектрального анализатора. Первые схемы регистрации бриллюэновского рассеяния предполагали необходимость доступа к обоим концам волоконной линии.

Лишь недавние достижения в области оптического усиления и акусто-оптической модуляции позволили японской фирме ANDO разработать мобильные приборы AQ8602, AQ8603, которые могут (подобно обычному рефлектометру) тестировать волокно с одной стороны.

3.3. Возможности бриллюэновского рефлектометра

Разработанный метод и устройство относятся к области измерительной техники, техники связи и оптоэлектроники и могут быть использованы в электротехнической промышленности, промышленности средств связи при производстве оптических волокон и волоконно-оптических кабелей, а также при прокладывании и эксплуатации волоконно-оптических трактов.

Известно, что бриллюэновский рефлектометр позволяет измерять рефлектограммы, представляющие собой зависимость интенсивности обратного рэлеевского рассеяния от длины волоконно-оптического тракта и бриллюэновское рассеяние, определяющее степень надежности волоконно-оптического тракта.

Внешне прибор похож на рефлектометр с оптическим разъемом, экраном и дисководом, расположенными на передней панели, и термопринтером, установленным сверху. Динамический диапазон AQ8602 достигает 30 дБ, а пространственное разрешение — 2 м при габаритах 480×436×240 мм и весе около 20 кг.

Прибор позволяет получать рефлектограммы оптических волоконно-оптических трактов с использованием короткоимпульсного сигнала, а также измерять расстояния до мест напряженного состояния ОВ, характеризующиеся низкой надежностью. Его длительность обратно пропорционально связана с разрешающей способностью и точностью измерений расстояний. Для определения мест волокна, находящихся в напряженном состоянии, в устройстве предусмотрен сдвигатель частоты излучения, позволяющий получать рефлекто-

граммы на различных фиксированных длинах волн. Места волокна, характеризующиеся напряженным состоянием, определяются путем сравнительного анализа полученных рефлектограмм.

3.4. Измерения натяжения с помощью бриллюэновского рефлектометра

Бриллюэновский рефлектометр марки AQ8602 (AQ8603) работает следующим образом (рис. 3.3): излучение лазера с длиной волны $\lambda_2 = 1,55$ мкм, стабилизированного по частоте, проходит через частотосдвигатель, выполняющий функцию амплитудного модулятора, и сдвинутым по частоте на величину $\Delta\nu$ поступает в волокно.

Возникший в нем под воздействием бриллюэновского рассеяния сигнал, сдвинутый по частоте на $\Delta\nu_B$, возвращается на фотодетектор, куда также поступает опорный (гетеродинный), идущий непосредственно от лазера сигнал. В результате на фотодетекторе возникают биения с частотой $\Delta\nu - \Delta\nu_B$, позволяющие одновременно с регистрацией рефлектограммы определять натяжение волокна. Например, если сдвиг частоты в частотосдвигателе соответствует бриллюэновскому сдвигу частоты в волокне без напряжений, то получится обычная рефлектограмма, а в случае появления локального его растяжения волокна на ней возникнет провал, вызванный расстройкой гетеродина. Программное обеспечение AQ8602 (AQ8603) позволяет восстанавливать распределение напряжения вдоль волокна.

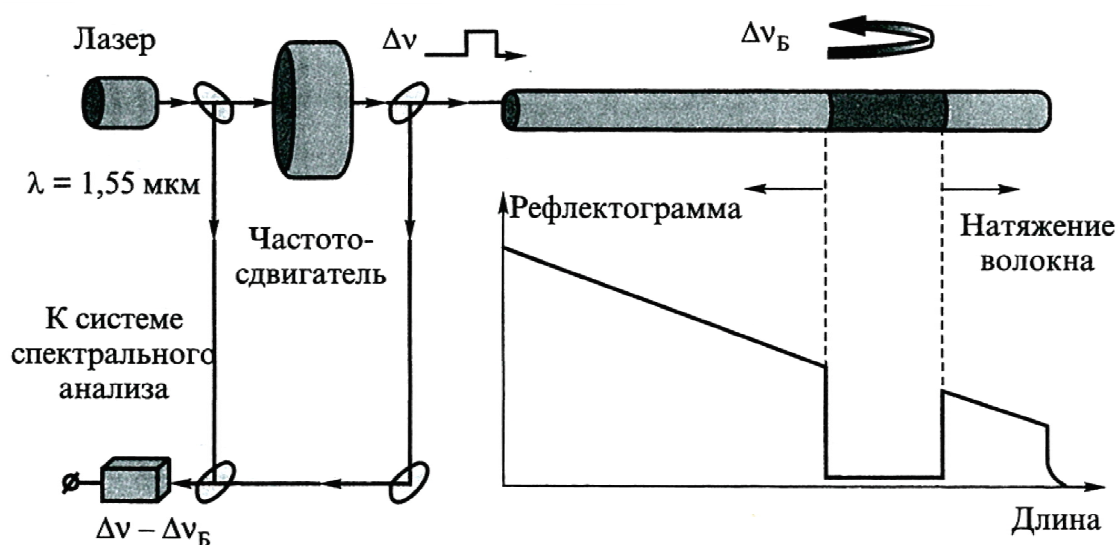


Рис. 3.3. Структурная схема бриллюэновского рефлектометра марки AQ8602

Сначала получают набор рефлектограмм при различных сдвигах частоты $\Delta\nu$. Затем определяют положение максимума кривой рассеивания для каждой длины волокна, которое соответствует бриллюэновскому сдвигу $\Delta\nu_B$, по которому компьютер рассчитывает его натяжение. Коэффициент пропорциональности зависит от температуры волокна и показателя преломления, вводимых в программу заранее. Обычно коэффициент пропорциональности берется равным 1 % удлинения волокна при сдвиге частоты 500 МГц. В бриллюэновской рефлектометрии, как это обычно бывает, точность относительных измерений выше точности абсолютных. Поэтому целесообразно пристыковывать измеряемую линию к дополнительной катушке со свободно уложенным волокном. Результаты таких измерений представлены на графике рис. 3.4, *а*, начальные участки которого (до длины 1800 м) соответствуют работе такой катушки. По вертикальной оси выведено значение натяжения волокна, одно деление соответствует удлинению 0,1 %.

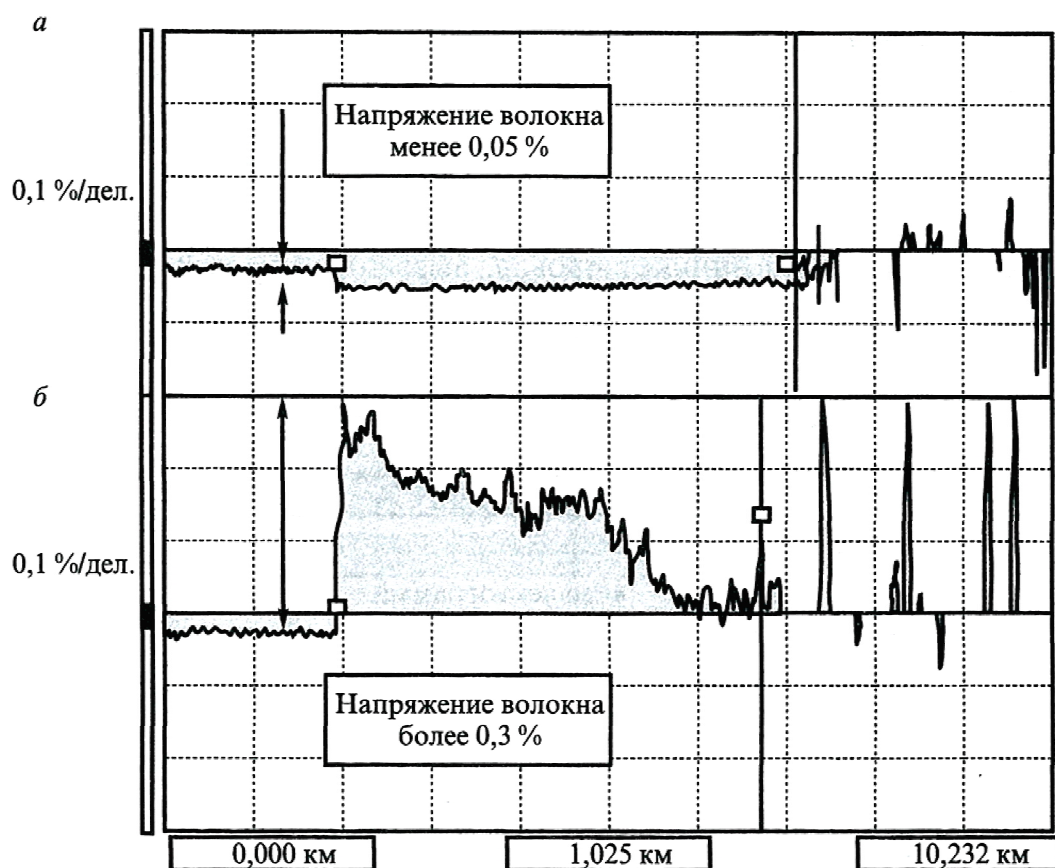


Рис. 3.4. Результаты измерений натяжений оптического волокна:
а — волокно лежит свободно внутри оптического модуля; *б* — волокно имеет натяжение

Результаты измерений кабеля, в котором волокно лежит свободно внутри оптического модуля, представлены на рис. 3.4, а, при этом прибор регистрирует натяжение волокна менее 0,05 %. Это значение является практическим пределом точности абсолютных измерений в волокне с неизвестным показателем преломления. Появление ступеньки на графике вызвано не натяжением волокна, а разбросом показателя преломления в измеряемом кабеле и опорном волокне. Убедившись в отсутствии натяжения, например, путем извлечения волокна из начального участка кабеля, в дальнейшем можно проводить относительные измерения в этом кабеле со значительно более высокой точностью — вплоть до 0,001 %. На рис. 3.4, б приведены результаты измерений распределения натяжения в механически нагруженном волокне, величина натяжения в нем превышает 0,3 %.

Натяжение, как видно из рис. 3.5, существенно изменяется вдоль кабеля, что связано с нарушениями технологии его изготовления.

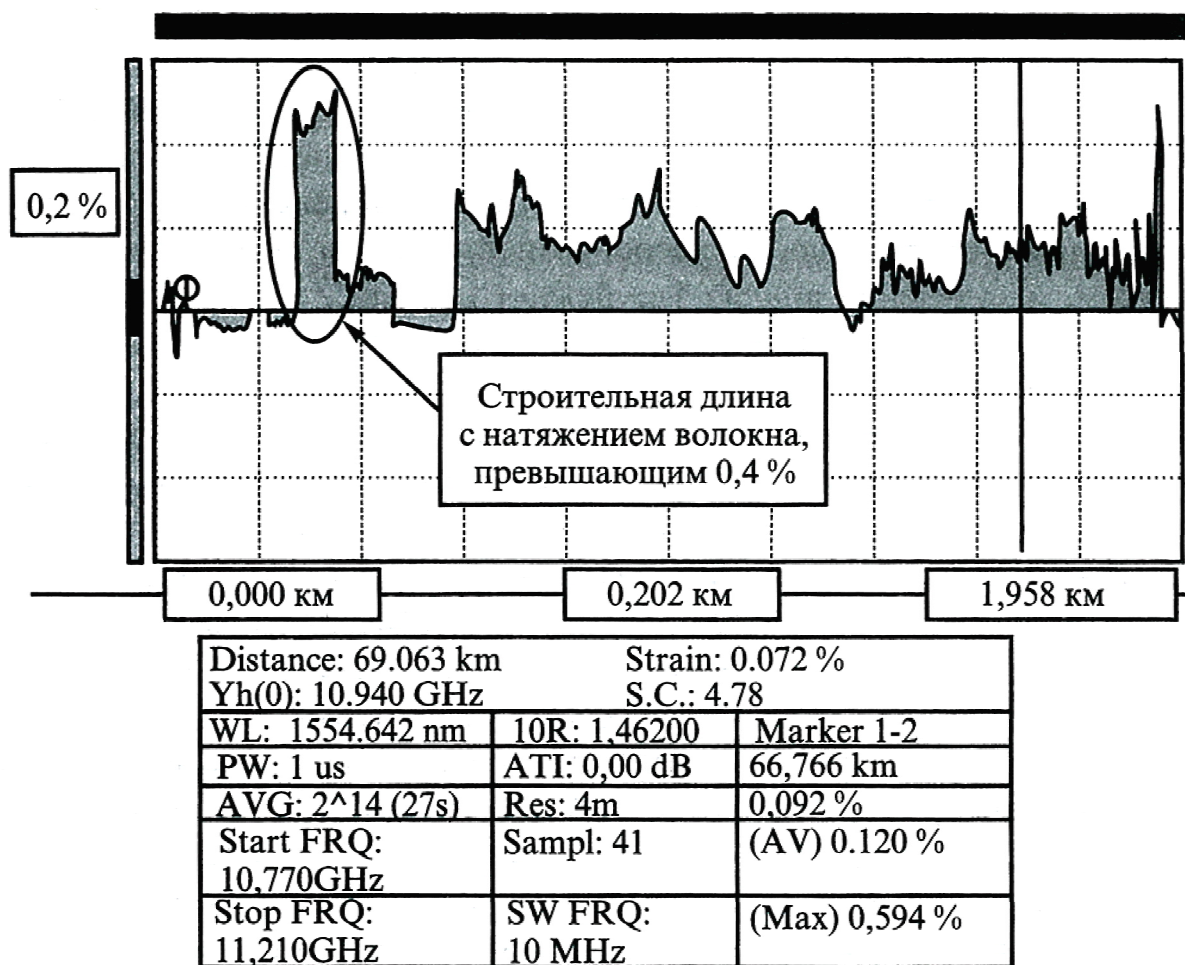


Рис. 3.5. Результаты измерений натяжения

Важно отметить, что прочие характеристики, в том числе оптические потери, находятся в пределах нормы и составляют 0,22 дБ/км. Таким образом, только на основании измерений бриллюэновского рассеяния этот кабель был забракован и ненадежный участок исключен из оптической линии. Достаточный динамический диапазон приборов AQ8602 (AQ8603) позволяет не только проверять строительные длины ОК, но и после монтажа оптической линии выявлять ее участки, обладающие пониженной надежностью. На графике приведено распределение натяжения волокна в кабеле реальной оптической линии длиной 179 км. Как видно из результатов анализа, среднее натяжение в кабеле составляет 0,12 %, тогда как максимальное значение превышает 0,59 %. Приведенные выше примеры демонстрируют возможности бриллюэновской рефлектометрии.

3.5. Применение бриллюэновской рефлектометрии

Массовое применение бриллюэновской рефлектометрии, как и большинства новейших технологий, сдерживается высокой стоимостью оборудования. Бриллюэновские рефлектометры фирмы ANDO AQ8602, AQ8603 дороже обычных рефлектометров почти в 10 раз. Поэтому применение этой технологии будет определяться как соображениями технической целесообразности, так и коммерческим аспектом, и тут ценен анализ зарубежного опыта.

В настоящее время лидером в использовании бриллюэновской рефлектометрии является Япония. Это объясняется не только высоким уровнем технической культуры вообще и оптоэлектроники в частности, но и рядом географических факторов. Так, следует отметить, что японским операторам междугородней связи (в первую очередь крупнейшему из них NTT Corp.) нередко после землетрясений приходится решать вопрос о возможности дальнейшего использования оптических линий. Кроме того, из-за высокой стоимости землеотвода большинство линий подвесные, поэтому подвержены избыточным нагрузкам из-за ветра и обледенения. А высокая урбанизированность территории приводит к тому, что кабельные коллекторы часто проходят вблизи транспортных магистралей и подвергаются вибрациям. На кабель также могут оказывать воздействие техногенные деформации грунта вблизи мостов и небоскребов. Указанные факторы в полной мере присутствуют при эксплуатации ВОК в условиях железнодорожного транспорта.

Трудно быть уверенным в надежности волоконно-оптической связи в таких экстремальных условиях без максимального использования методов контроля. Требования к надежности связи постоянно возрастают, что является одним из аргументов в пользу волоконной оптики. Оптическими линиями связаны не только центры деловой активности общества, но и органы государственного управления. Растет ответственность поставщиков за бесперебойность услуг связи. У нас еще иногда отказы связи рассматривают как стихийное бедствие, а не нарушение контракта, влекущее финансовую ответственность. Но ситуация изменяется, и бриллюэновская рефлектометрия, без сомнения, найдет достойное место в практике отечественной связи.

Глава 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ВОЛП

Измерения в ВОЛП можно разделить на две группы.

1. Измерения в процессе строительства:

- входной контроль;
- оценка качества строительных работ с целью контроля характеристик и сравнения с нормативными параметрами;
- приемосдаточные испытания.

2. Измерения в процессе эксплуатации:

- профилактические;
- аварийные;
- входной контроль;
- контрольные после аварийно-восстановительных работ;
- непрерывный мониторинг с помощью встроенного в ВОЛП контрольно-измерительного оборудования.

Входной контроль качества строительных длин кабеля и других компонентов производится перед проведением строительных и ремонтных работ, связанных с заменой кабеля и прочих компонентов ВОЛП. При входном контроле измеряют вносимое затухание и при известной строительной длине по нему рассчитывают коэффициент затухания, потери в местах контрольной сварки различных строительных длин между собой и для паспортизации регистрируют рефлектограммы всех ОВ строительной длины.

Оценка качества строительных работ включает измерение вносимого затухания всех ОВ на смонтированных участках, потерь во всех неразъемных соединениях.

Приемосдаточные испытания, профилактические и контрольные измерения аварийно-восстановительных работ включают измерения вносимого затухания всех ОВ кабельного участка, потерь в стыках, коэффициентов затухания на разных участках, а также проведение паспортизации кабельного участка исходя из результатов измерений и его рефлектограммы.

Аварийные измерения проводятся для определения характера повреждения и расстояния до него.

4.1. Основные параметры линейных оптических трактов волоконно-оптических систем передачи ВОСП

4.1.1. Схема линейного тракта ВОСП

В цифровых волоконно-оптических системах передачи [2] можно выделить линейный оптический тракт, который может работать на одной длине волны оптического излучения (рис. 4.1, а) или на нескольких волнах с использованием аппаратуры спектрального уплотнения (рис. 4.1, б). Оборудование оконечных пунктов (ОП) линейного оптического тракта, не использующего аппаратуры спектрального уплотнения, содержит:

- преобразователь кода (ПК1) аппаратуры ИКМ в линейный код, который предотвращает появление длинных «единиц» и «нулей», приводящих к межсимвольным искажениям;

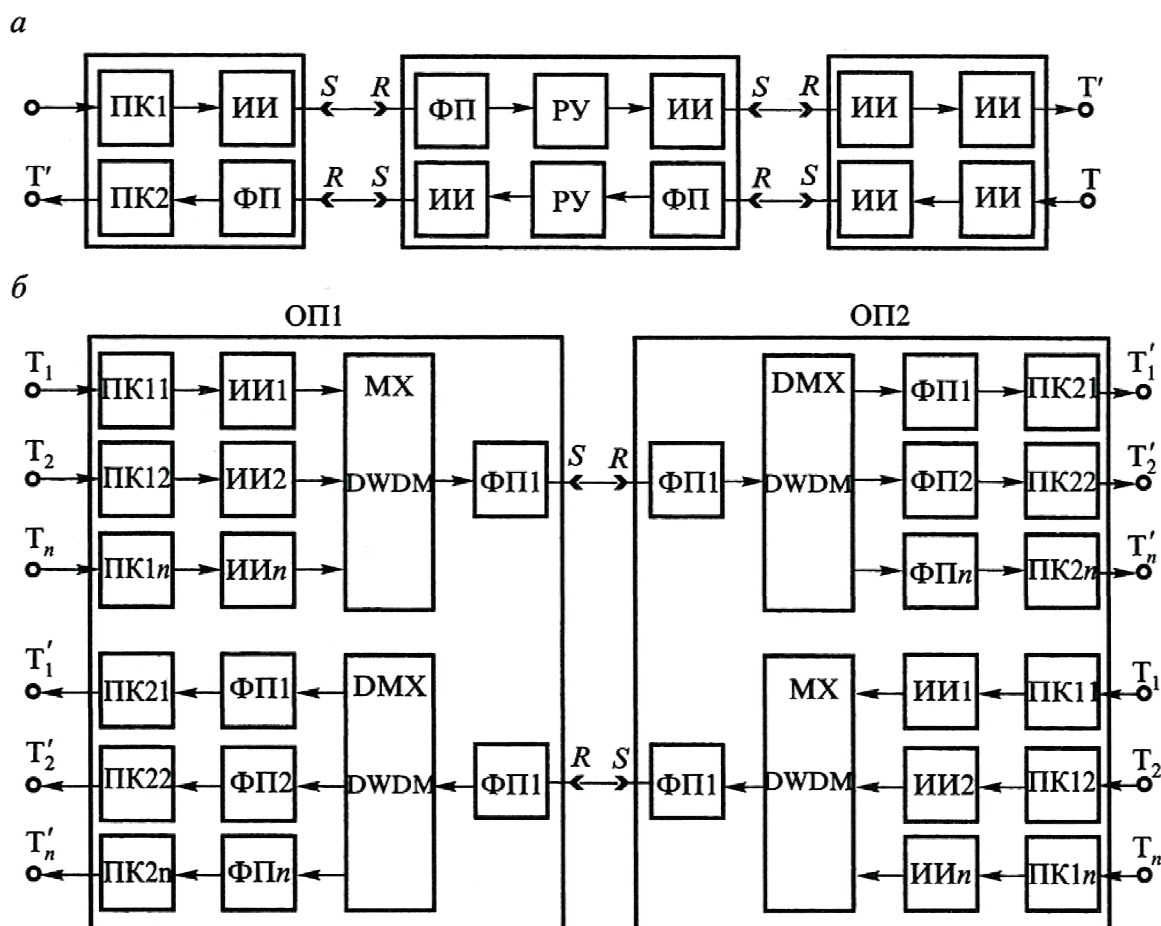


Рис. 4.1. Общая схема передачи ИКМ сигналов по волоконному тракту (ВТ): а — оптический линейный тракт цифровой системы передачи (ЦСП) с плезиохронной и синхронной иерархиями; б — оптический линейный тракт ЦСП со спектральным уплотнением

- преобразователь кода (ПК2), выполняющий обратное преобразование кодов;
- источники излучения (ИИ) с усилителями накачки;
- фотоприемные устройства (ФП).

Для компенсации вносимого затухания в оптическом кабеле между точками S (передатчик) и R (приемник) используются регенерационные пункты (РП), которые восстанавливают ослабленный и зашумленный сигнал. В состав РП помимо ИИ и ФП входят решающие устройства (РУ), определяющие характер принятого сигнала («1» или «0»),

Точки T и T' являются точками стыка канала передачи цифрового группового тракта соответствующей цифровой иерархии с оптическим линейным трактом. Параметры цифровых групповых трактов в точках стыка нормированы с учетом рекомендаций Международного Союза электросвязи (МСЭ). Определены параметры входного и выходного сигналов в точках T и T' , типы кодов, сопротивления нагрузок, скорости передачи в электрическом и оптическом трактах, коэффициент ошибок, характеристики дрожания фазы.

Точки R и S являются оптическими стыками ВОСП. Оптические параметры отнесены для передатчика к точке S , для приемника — к точке R , а длина оптического пути определяется расстоянием между этими точками.

Линейный оптический тракт (рис. 4.1, б) позволяет передавать по двум волокнам несколько высокоскоростных цифровых потоков на разных длинах волн ($\lambda_1 - \lambda_n$), которые объединяются в один поток с помощью мультиплексора MX DWDM. В связи с тем, что в мультиплексоре при объединении потоков возникают значительные потери, на его выходе устанавливается выходной оптический усилитель (ОУ). На приемном конце ослабленный сигнал перед поступлением на демультиплексор DMX DWDM также усиливается во входном ОУ.

4.1.2. Основные параметры передающего устройства

К основным оптическим параметрам передающего устройства относятся:

1. Средняя длина волны излучения λ_0 и ширина его спектра $\Delta\lambda$, которая может определяться как среднеквадратическое значение или на уровне 0,5 от максимальной величины. Так обычно определяют ширину спектра для светоизлучающих диодов и многомодовых ла-

зеров. Для одномодовых, одночастотных лазеров она чаще выбирается на уровне -20 дБ (1 % от максимальной величины). Для определения длины волны λ_0 и ширины спектра $\Delta\lambda$ излучения используют анализаторы оптического спектра, использующие оптическую фильтрацию с помощью дифракционной решетки или интерферометра.

2. Средняя мощность излучения P_0 , вводимого в ОВ, при равновероятностной передаче 1 и 0, которая может измеряться в единицах мощности Вт или в относительных логарифмических единицах дБм. В качестве испытательного сигнала для определения параметров передающего устройства можно использовать псевдослучайные последовательности (ПСП). Важным параметром излучателя является нестабильность излучаемой мощности, характеризующаяся отклонением средней мощности, которая может измеряться в единицах мощности Вт или в относительных логарифмических единицах дБ с помощью оптических ваттметров, градуированных в соответствии с фиксированными длинами волн излучения (0,85; 1,3; 1,55 и 1,64 мкм) в абсолютных и относительных логарифмических единицах. Оптические ваттметры обычно совмещают в одном корпусе с источником излучения. Такие приборы называют *мультиметрами* или *оптическими тестерами*. Комплект из двух таких приборов позволяет проводить измерения затухания в ОВ и пассивных элементах ВОСП.

3. Коэффициент гашения (экстинкции), который определяется отношением мощностей излучения при передаче 1 и 0. Его можно выразить простым отношением или его логарифмом, выраженным в дБ, анализируя глаз-диаграмму, получающуюся при подаче выходного оптического сигнала на собственный оптический вход. Исключить возможные перегрузки фотоприемника (ФП) можно включением между оптическими входом и выходом оптического аттенюатора. При выборе испытательной ПСП для измерений по глаз-диаграмме необходимо, чтобы число регистров в генераторе ПСП было равно максимально возможному числу единиц, которые могут идти подряд в используемом линейном коде. Например, для ВОСП, использующей код V4B5, подряд может идти не более 5 единиц или нулей.

4. Форма выходных оптических импульсов (время нарастания и спада, длительность, частота) определяется по глаз-диаграмме, которая должна соответствовать шаблону глаз-диаграммы для данной ВОСП.

4.1.3. Основные параметры фотоприемного устройства

К основным оптическим параметрам фотоприемного устройства (ФПУ) можно отнести:

1. Чувствительность ФПУ, которая определяется как минимальное среднее значение мощности оптического излучения в точке R , при которой обеспечивается заданный коэффициент ошибок (обычно 10^{-10}). Чувствительность ФПУ может быть выражена в единицах мощности или в относительных логарифмических единицах дБм. Для ее измерения необходимы: оптический ваттметр, измеритель коэффициента ошибок и регулируемый аттенюатор.

2. Динамический диапазон ФПУ, который определяется как отношение максимальной мощности излучения в точке R , при которой обеспечивается заданный коэффициент ошибок, к чувствительности. Динамический диапазон обычно выражают в относительных логарифмических единицах дБ. При определении динамического диапазона используются те же приборы, что и для определения чувствительности.

3. Коэффициент отражения ФПУ определяется отношением мощностей отраженной и падающей на ФПУ волн. Для его определения может использоваться оптический рефлектометр (ОР) или специальный прибор. Количественная оценка коэффициента отражения с помощью ОР осложняется при учете затухания в волоконном тракте между ОР и ФПУ. Коэффициент отражения может быть выражен соответствующим отношением или его логарифмом в дБ.

4.1.4. Основные параметры линейного оптического тракта

К основным параметрам линейного оптического тракта можно отнести:

1. Вносимое затухание (ослабление оптического сигнала в линейном тракте между точками S и R). Для его измерения используют оптические тестеры, которые могут представлять собой комплект из источника и приемника излучения. Однако чаще для этой цели используют оптические мультиметры, объединяющие в одном корпусе источник и приемник излучения. Основными причинами погрешности измерения являются неодинаковость потерь в рабочих разъемах излучателей ВОСП и оптического тестера, а также отличие в длинах их волн.

2. Дисперсионные искажения (уширение оптических импульсов) могут выявляться и измеряться при эксплуатации путем сравнения глаз-диаграмм в точках S и R . Сложность заключается в том, что при малых затуханиях и расстояниях уширение очень незначительно и его трудно измерить, а при больших — мало отношение сигнала к шуму на дальнем конце, снижающее точность измерений по глаз-диаграмме.

3. Возвратные потери (отражения от неоднородностей в ВТ) нормируются, так как в одномодовых волоконных трактах (ВТ) обратно отраженные импульсы интерферируют в резонаторе полупроводникового лазера с излучаемыми, изменяя амплитуду и искажая форму последних импульсов. Это приводит к увеличению коэффициента ошибок, что недопустимо. Возвратные потери, как правило, выражаемые в логарифмических единицах, как и коэффициент отражения от ФПУ, измеряются ОР или специальными приборами.

Энергетические уровни, характеризующие работу реальной ВОСП, показаны на рис. 4.2.

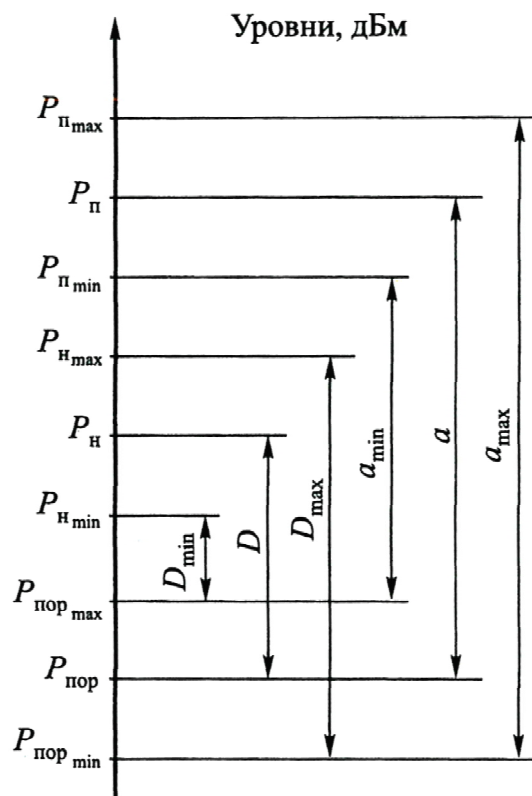


Рис. 4.2. Диаграммы энергетических уровней ВОСП:

$P_{п}$ — уровень на выходе передатчика в точке S ; $P_{н}$ — уровень насыщения приемника; $P_{пор}$ — пороговый уровень приемника; D — динамический диапазон ВОСП; a — допустимое затухание в линейном тракте

4.2. Характеристики цифровых ВОСП плезиохронной иерархии

В нашей стране были разработаны ГОСТ 27908-88 «Стыки цифровых ВОСП первичной сети ЕАСС» и ГОСТ 28872-90 «Аппаратура линейных трактов цифровых ВОСП. Типы. Основные параметры. Общие технические требования». В соответствии с ними предусматривались ВОСП со скоростями 2, 8, 34, 140 и 565 Мбит/с, работающие на

длинах волн 850, 1300 и 1550 нм, с использованием многомодовых (МВС) и одномодовых (ОВС) волоконных световодов. Оговаривались максимальные затухания оптического регенерационного участка от 22 дБ при использовании светодиода (СД) и до 51 дБ — при использовании лазерного диода (ЛД) ($\lambda = 850$ нм) и среднее значение вводимой в ОВ мощности на уровне 0 дБм (для ЛД) до -9 дБм (для СД). Запас энергетического потенциала рекомендовалось выбирать более 3 дБ, допустимые потери в неразъемных соединениях — не выше 0,1 дБ для ОВС и 0,3 дБ для МВС, в разъемных соединениях — не выше 1 дБ. Динамический диапазон приемного устройства должен был превышать 15 дБ.

4.3. Характеристики цифровых ВОСП синхронной иерархии

Параметры оптических стыков, представленные в табл. 4, для синхронной цифровой иерархии (СЦИ) содержатся в рекомендации МСЭ G.957 и в [3]. Для стыков ВОСП всех иерархий рекомендовано бинарное кодирование сигнала кодом NRZ (без возврата к 0). Для исключения длинных последовательностей 1 и 0 сигнал скремблируется в соответствии с рекомендацией C.709. Предъявлены более жесткие требования к форме импульса передатчика (контроль осуществляется по шаблону глаз-диаграммы передающего устройства в точке S), а также к спектральным характеристикам источников излучения. Введены требования к возвратным потерям, приведенным к точке S , и максимальному коэффициенту отражения между точками S и R .

Таблица 4

Параметры оптических стыков

Наименование параметров	Нормируемые значения параметров			
	ГОСТ 27908-88	ГОСТ 28872-90		Рекомендация G.956
	Местная	Внутризон.	Магистр.	
Параметры ЦВОСП				
Номинальная скорость передачи, Мбит/с	2, 8, 34,140	8, 34,140	140, 565	2; 8; 34; 140; 565
Диапазон рабочих длин волн, нм	850; 1300; 1550	850; 1300; 1550	1300; 1550	850; 1300; 1550
Линейный код	Не нормируется	<i>mBnB</i> ; 10 <i>B1P1R</i>		Не нормируется

Наименование параметров		Нормируемые значения параметров					
		ГОСТ 27908-88		ГОСТ 28872-90		Рекомендация G.956	
		Местная		Внутризон.	Магистр.		
Параметры ЦВОСП							
Максимальное затухание оптического регенерационного участка тракта, дБ		850	1300	По ГОСТ 27908		850	1300
	2 Мбит/с $\Delta F=10$ МГц	51(ЛД)	46(ЛД) 30(СД)			51(ЛД)	46(ЛД) 30(СД)
	8 Мбит/с $\Delta F=20$ МГц	47(ЛД)	41(ЛД)			47(ЛД)	
	34 Мбит/с $\Delta F=50$ МГц	41(ЛД)	35(ЛД) 22(СД)			41(ЛД)	35(ЛД) 22(СД)
Параметры передающего устройства (точка S)							
Тип источника излучения		СД; ЛД		СД; ЛД	СД; ЛД	СД; ЛД	
Среднеквадратичная ширина спектра излучения, нм		Не нормируется		2,0—5,0 (ЛД)	0,3—2,0 (ЛД)	Не нормируется	
Среднее значение мощности излучения, вводимого в ОВ, дБм		Не нормируется		От -9 до 0 (ЛД)	Не менее 0	Не нормируется	
Минимальный коэффициент экстинкции (гашения), дБ		Не нормируется		Не нормируется		Не нормируется	
Параметры приемного устройства (точка R)							
Чувствительность приемного устройства, дБм	8 Мбит/с	Не нормируется		От -53 до -47	Не указано	Не нормируется	
	34 Мбит/с			От -48 до -35	Не указано		
Динамический диапазон, дБ		Не нормируется		15	15	Не нормируется	
Запас энергетического потенциала аппаратуры, дБ		3		Не нормируется		3	
Параметры волоконно-оптического тракта (между точками S и R)							
Тип оптического волокна		ММ; ОМ		ММ; ОМ		ММ; ОМ	

Наименование параметров	Нормируемые значения параметров			
	ГОСТ 27908-88	ГОСТ 28872-90		Рекомендация G.956
	Местная	Внутризон.	Магистр.	
Параметры волоконно-оптического тракта (между точками <i>S</i> и <i>R</i>)				
Максимальная дисперсия, пс/км	Не нормируется	100—250	Не указ.	300 для 140 мбит/с
Потери в разъёмном соединении, дБ	0,1 для ОМ; 03 для ММ.	Не нормируется	Не нормируется	
Потери в разъёмном соединении, дБ				

ОК используются в СЦИ для внутростанционной (внутриобъектовой) и межстанционной связи. Определены 3 категории применения:

- I — внутростанционные, с длинами менее 2 км;
- S — короткие межстанционные, с длинами примерно до 15 км;
- L — длинные межстанционные, достигающие около 40 км в окне 1310 нм и около 60 км — в окне 1550 нм.

Аппаратура категорий I и S минимальна по стоимости, а категории L — дорогая, но обеспечивающая максимальную длину регенерационных секций. Классификация оптических стыков приведена в табл. 5.

Таблица 5

Классификация оптических стыков

Код применения		Внутростанционные	Межстанционные				
			Короткие		Длинные		
Номинальная длина волны излучения, нм		1310	1310	1550	1310	1550	1550
Тип волокна по рекомендации МСЭ		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652 G.654	G.653
Расстояние, км		<2	15	15	40	60	60
Уровень СТМ	СТМ-1	1-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2	L-1.3
	СТМ-4	1-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3
	СТМ-16	1-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3

Значения оптических параметров для СТМ-1 приведены в табл. 6.

Указание типа излучателя в табл. 6 носит рекомендательный характер и не является жестким требованием. Например, MLM-лазер всегда может быть заменен SLM-лазером, но это приводит к удорожанию аппаратуры. Спектральные характеристики передатчика оп-

Таблица 6

Значения оптических параметров для СТМ-1

Цифровой сигнал	СТМ-1 в соответствии с рекомендациями G.707, G.709 и номинальной скоростью передачи 155.520 Мбит/с									
Код применения	1-1		S-1.1	S-1.2		L-1.1		L-1.2	L-1.3	
Рабочий диапазон длин волн, нм	1260—1360		1260—1360	1430—1569	1430—1580	1280—1335		1480—1580	1534—1566/ 1508—1580	1480—1580
Передатчик в эталонной точке S										
Тип излучателя	MLM	LED	MLM	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	MLM	SLM
Спектральные характеристики										
Максимальная СК ширина спектра, нм	40	80	7,7	2,5	-	4	-	-	4/2,5	-
Макс. ширина спектра на уровне минус 20 дБ, нм	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1
Миним. подавление соседних мод, дБ					30		30	30		30
Средняя излуч. мощность, дБм: максимальная минимальная	-8 -15	-8 -15	-8 -15	-8 -15		0 -5	0 -5	0 -5	0 -5	
Коэффициент гашения, дБ	8,2		8,2	8,2	8,2	10		10	10	
Оптический тракт между S и R										
Затухание, дБ	0-7		0-12	0-12		10-28		10-28	10-28	
Максимальная дисперсия, пс/нм	нзд		96	296	нзд	нзд		нзд	185/296	
Мин. ВП в т. S, дБ	нзд		нзд	нзд		нзд		20	нзд	
Максим. 01 раж. между 8 и K, дБ	нзд		нзд	нзд		нзд		-25	нзд	
Приемник в эталонной точке R										
Мин. чувствит., дБм	-23		-28	-28		-34		-34	-34	
Мин. перегрузка, дБм	-8		-8	-8		-10		-10	-10	
Макс. дополнительные потери ОТ, дБ	1		1	1		1		1	1	
Макс. отраж. приемника в т. R, дБ	нзд		нзд	нзд		нзд		-25	нзд	

Примечание. MLM (multi-longitudinal mode) — лазер со многими продольными модами; SLM (single-longitudinal mode) — лазер с одной продольной модой; нзд — требования не задаются.

ределяются только параметрами лазера. Максимальная ширина спектра излучения для передатчиков с MLM, максимальная ширина спектра излучения на уровне -20 дБ (1 %) и минимальное подавление соседних мод для передатчиков с SLM могут контролироваться при изготовлении аппаратуры ВОСП СЦИ.

4.4. Параметры оптических волокон, используемых в ВОСП

Средняя мощность излучения — это средняя мощность псевдослучайной последовательности оптических импульсов, вводимых в волокно. Она задается как диапазон значений для обеспечения стоимостной оптимизации системы передачи и учета допусков при работе в стандартных условиях, деградации оптического разъема передатчика, погрешностей измерения и эффектов старения. Средняя мощность лазера поддерживается постоянной с помощью системы автоматического регулирования.

Для каждого типа применения, указанного в табл. 6, задаются затухание и дисперсия между точками S и R , а системы, ограниченные дисперсией, имеют максимально допустимые ее значения. Эти значения учитывают максимально допустимые оптические пути, спектральные характеристики передатчика и дисперсию волокна в диапазоне рабочих длин волн. Системы, ограниченные по затуханию, обычно не критичны к величине дисперсии, поэтому в табл. 6 требования по дисперсии для этих систем не задаются.

В линейных трактах ВОСП используются как ММ (в PDH), так и ОМ

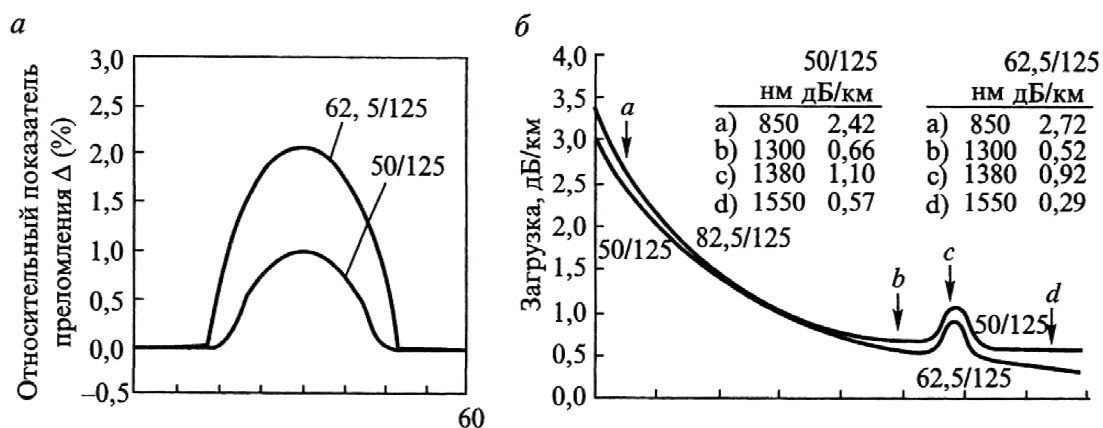


Рис. 4.3. Параметры градиентных многомодовых ВС:

a — профили показателей преломления волокон 50/125 и 62.5/125; b — характерные кривые спектральных потерь мощности

(в PDH и SDH). Все ОВ должны соответствовать рекомендациям MG3 G651-G654.

В рекомендациях G.651 излагаются градиентные ММ ОВ (ММ ВС со ступенчатым профилем показателя преломления не рекомендованы к применению). ОВ с диаметром сердцевины 50 мкм используются в системах дальней связи, для ЛВС используют наряду с ВС 50 мкм также ВС с сердцевиной 62,5 мкм.

Профили показателя преломления для этих ОВ показаны на рис. 4.3, а. Видно, что ОВ для ЛВС отличается большей разницей показателей преломления, а значит большей числовой апертурой (и дисперсией). В ЛВС, где используется множество соединений, очень важно минимизировать потери в разъемных соединениях, поэтому идут на увеличение диаметра сердцевины. Это приводит к ухудшению широкополосности, но для ЛВС это не имеет значения, так как там рекомендуемые длины не превышают 2 км.

Зависимости коэффициента затухания от длины волны показаны на рис. 4.3, б, где видно, что на коротких волнах $\alpha_{62,5} > \alpha_{50,0}$, а на длинных — наоборот.

Рекомендуемые параметры ММ ОВ показаны в табл. 7, из которой следует, что числовая апертура ОВ с сердцевиной 62,5 мкм существенно больше, а широкополосность — существенно меньше, чем у ОВ с сердцевиной 50 мкм.

Из-за недостаточной широкополосности ММ ОВ используются для

Таблица 7

Рекомендуемые параметры ММ ОВ

Параметры	Градиентное, многомодовое волокно	
	50/125	62,5/125
Номинальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	<2,4	<2,8
Номинальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	<0,5	<0,6
Максимальное затухание на длине волны 850 нм (дБ/км)	<2,5	<3,0
Максимальное затухание на длине волны 1300 нм (дБ/км)	<0,8	<0,7
Полоса пропускания на длине волны 850 нм (МГц/км)	>400	>200
Полоса пропускания на длине волны 1300 нм (МГц/км)	>800	>400
Длина волны нулевой дисперсии, λ_0 (нм)	1297—1316	1332—1354
Наклон нулевой дисперсии, S_0 (пс/(нм ² ·км))	< 0,101	< 0,097
Диаметр сердцевины, d (мкм)	50,0 ± 3,0	62,5 ± 3,0
Числовая апертура, NA	0,200 ± 0,015	0,275 ± 0,015

Параметры	Градиентное, многомодовое волокно	
	50/125	62,5/125
Рабочий диапазон температур, °С	-60 — +85	-60 — +85
Вносимое затухание в температурных пределах -60 — +85 °С на длинах волн 850 и 1300 нм (дБ/км)	<0,2	<0,2
Внос, затухание в темп. пределах -10 — +85 °С, влажности до 98 % на дл. волн 850 и 1300 нм (дБ/км)	<0,2	<0,2
Стандартная длина волокна, поставл. на катушке (м)	1100—4400	1100—8800
Диаметр оболочки (мкм)	125,0 + 2,0	125,0 + 2,0
Радиальное откл. сердцевинки относит, оболочки (мкм)	<3,0	<3,0
Диаметр защитного покрытия (мкм)	245 ± 10	245 + 10
Отклонение сердцевинки от окружности	<5%	<5%
Тестовое усилие на разрыв (Гн/м ²)	>0,7	>0,11
Эффект, показ, преломления n_{eff} дл. волны 850 нм	1,4897	1,5014
Эффект, показ, преломления n_{eff} на длине волны 1300 нм	1,4856	1,4966

ВОСП (PDH) с малой скоростью передачи — 2 и 8 Мбит/с. Для высокоскоростных ВОСП со скоростями 34, 140 (PDH) и 155, 620, 2500, 10 000 (SDH) Мбит/с используются ОК с ОМ ОВ.

Первым высококачественным ОМ ОВ был ВС SF, оптимизированный на $\lambda = 1310$ нм со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 4.4, а). Показатель преломления сердцевинки постоянен и превышает показатель преломления оболочки примерно на 1 %. Одномодовый режим работы в этих ОВ достигнут благодаря уменьшению диаметра до 8,5 мкм. Параметры этих ВС регламентируются рекомендацией МСЭ G.652.

Эти ВС имеют дисперсию на $\lambda = 1310$ нм менее $3,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$, а на

$\lambda = 1550$ нм их дисперсия возрастает до $18 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$. Поэтому для вы-

сокоскоростных ВОСП на $\lambda = 1550$ нм были разработаны ОМ ОВ (с градиентным профилем, показанным на рис. 4.4, б) со смещенной дисперсией (DSF), которые имели дисперсию на $\lambda = 1550$ нм менее

$3,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$, а на $\lambda = 1310$ нм — до $18 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$. Затухание этих волокон на $\lambda = 1550$ нм в 2—2,5 раза меньше, чем на $\lambda = 1310$ нм.

В последнее десятилетие были предприняты попытки существен-

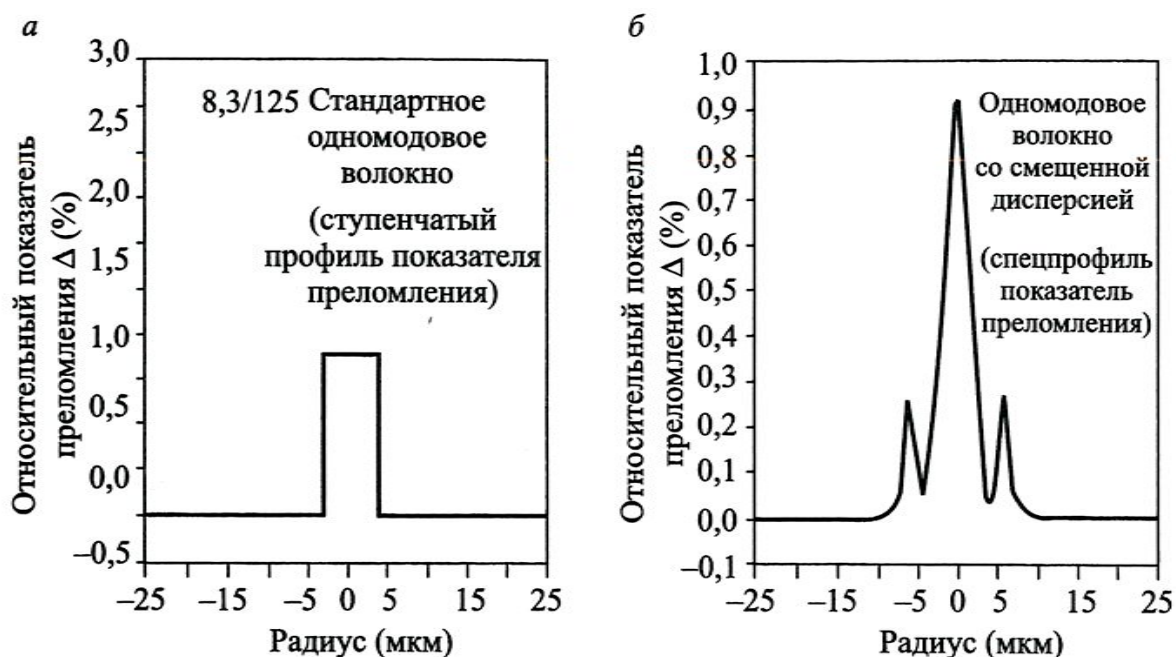


Рис. 4.4. Профили показателей преломления одномодовых ВС:
 а — ступенчатое одномодовое волокно; б — одномодовое волокно со смещенной дисперсией

но увеличить скорость передачи по одному ОВ. Рассматривались два основных подхода.

1. Использование для связи оптических солитонов, которые могут распространяться по ОВ с очень малыми дисперсными искажениями. Теоретически и экспериментально было доказано, что возможно создание солитонных ВОСП со скоростями 80 Гбит/с и длиной участка регенерации в несколько тысяч км. Однако из-за того, что солитоны существуют в ОМ ОВ только за счет нелинейных процессов, для функционирования солитонных ВОСП необходимо вводить в ОВ значительные мощности — от нескольких десятков до сотен мВт. Для компенсации затухания в линейном тракте должны использоваться оптические усилители с длиной усилительного участка, составляющей несколько десятков км.

2. Использование спектрального уплотнения, т.е. высокоскоростной передачи по одному ОВ излучения с несколькими длинами волн. Такие системы получили название Wavelength Division Multiplexing (WDM) — система спектрального мультиплексирования. Первыми были разработаны устройства WDM, позволяющие одновременно передавать сигналы с $\lambda = 0,85$ и $\lambda = 1,3$ мкм либо с $\lambda = 1,31$ и $\lambda = 1,55$ мкм или на всех трех длинах волн. Однако они не получили широкого

распространения, в первую очередь, из-за того, что на таких разных длинах волн сильно отличается затухание, а значит, и длины регенерационных участков.

Более современными являются устройства спектрального уплотнения с высокой плотностью Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), т.е. с малыми (не более 2 нм) интервалами между соседними длинами волн. Наибольший интерес представляют длины волн около 1550 нм, так как здесь ОВ имеет наименьшее затухание. Кроме того, в диапазоне 1528—1560 нм работает лучший на сегодняшний день оптический усилитель на основе волокна, легированного ионами эрбия.

Самым важным параметром в технологии DWDM, бесспорно, является расстояние между соседними каналами. Пространственное расположение каналов стандартизуется. Сектор по стандартизации телекоммуникаций ITU-T утвердил частотный план DWDM (табл. 8) с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц, что соответствует $\Delta\lambda = 0,8$ нм. В табл. 8 показаны сетки этого частотного плана с различной степенью разреженности каналов. Все сетки, кроме одной — с интервалом 500/400, имеют равноудаленные каналы. Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств полностью оптической сети, а также легче наращивать ее. Из табл. 8 видно, что в диапазоне 1528—1560 нм можно разместить до 40 отдельных каналов, каждый с пропускной способностью 10 Гбит/с. Это позволяет передавать по одному ВС информацию со скоростью 400 Гбит/с, а по ОК, содержащему 32 ОВ, — 8,4 Тбит/с, что превосходит любые требования к существующим системам связи.

Логично было бы использовать для ВОСП с DWDM ОМ ВС со смещенной

Таблица 8

Сетки частотного плана DWDM

Частота, ТГц	Интервал 100 ГГц (8 каналов и более)	Интервал 200 ГГц (4 канала и более)	Интервал 400 ГГц (только 4 канала)	Интервал 500/400 ГГц (только 8 каналов)	Интервал 600 ГГц (только 4 канала)	Интервал 1000 ГГц (только 4 канала)	Длина волны, нм
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12

Окончание табл. 8

Частота, ТГц	Интервал 100 ГГц (8 каналов и более)	Интервал 200 ГГц (4 канала и более)	Интервал 400 ГГц (только 4 канала)	Интервал 500/400 ГГц (только 8 каналов)	Интервал 600 ГГц (только 4 канала)	Интервал 1000 ГГц (только 4 канала)	Длина волны, нм
195,7		*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*		*			1546,12
193,8							1546,92
193,7	*	*	*		»		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	4			*	1549,32
193,4	*			»			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
192,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

дисперсией, однако экспериментальные и теоретические исследования показали, что за счет нелинейных процессов, возникающих в волокне на длинах волн, близких к длине волны нулевой дисперсии, появляются перекрестные искажения, приводящие к ухудшению качества связи.

В связи с этим были созданы волокна с ненулевой смещенной дисперсией. У такого волокна длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы полосы пропускания эрбиевого усилителя. Широко используются две марки волокна NZDSF: волокно TrueWave™ фирмы Lucent Technologies и волокно SMF-LS™ фирмы Corning Optical Fiber. У волокна TrueWave™ длина волны нулевой дисперсии — 1523 нм, а у SMF-LS™ она лежит чуть выше 1560 нм. В 1998 г. фирма Corning Optical Fiber выпустила еще одну марку волокна NZDSF — волокно LEAF™. Зависимость дисперсии этих волокон от длины волны приведена на рис. 4.5, а их характеристики — в табл. 9.

Из табл. 9 видно, что данные волокна имеют близкие характеристики.

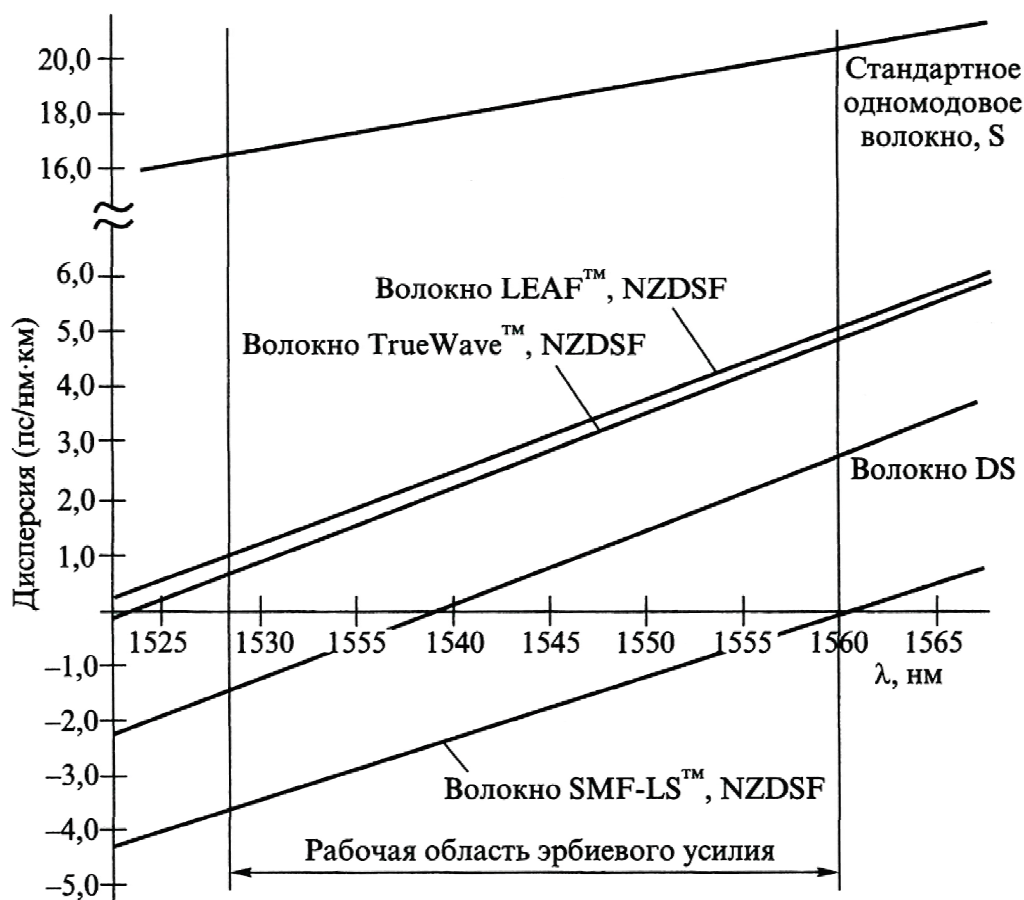


Рис. 4.5. Зависимость дисперсии в одномодовых ВС от длины волны

Характеристики волокон NZDSF

Характеристики	TrueWave™	SMF-LS™	LEAF™
Главное рабочее окно (нм)	1550	1550	1550
Затухание			
Максимальное затухание на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0,22—0,25	<0,25	<0,25
Максимальное затухание на длине волны 1310 нм (дБ/км)	н/д	<0,5	н/д
Макс, затухание в диапазоне 1525—1575 нм (дБ/км)	<0,30	<0,30	<0,30
Затухание на пике ОН" 1383 ± 3 нм (дБ/км)	<1,0	<2,0	<2,0
Затухание при изгибе на длине волны 1550 нм (дБ)	<0,50 (1 вит. 0,32 мм), < 0,05 (100 вит. 0,75 мм)	< 0,50 (1 вит. 0,32 мм) < 0,05 (100 вит. 0,75 мм)	н/д
Затухание на сухом стыке при длине волны 1550 нм (дБ)	<0,10	0,10	н/д
Хроматическая дисперсия в зоне ненулевой дисперсии			
ГШП (пс/нм·км)	0,8(1540-60 нм)	н/д	1,0(1540-60 нм)
тах (пс/нм·км)	4,6(1540-60 нм)	-3,5 (1530-1560 нм)	6,0(1540-60 нм)
Наклон нулевой дисперсии δ_0 (пс/нм ² ·км)	н/д	<0,092	н/д
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 (нм)	<1540	>1560	н/д
Диаметр модового поля при длине волны 1550 нм (нм)	8,4 ± 0,6	8,4 ± 0,5	9,5 ± 0,5, 9,6 (тип.)
Кабельная длина волны отсечки $\lambda_{ср}$ (нм)	<1260	<1260	н/д
Поляризационная модовая дисперсия (пс/т/км)	<0,5 при 1550 нм (тах), < 0,1 при 1550 нм (тип.)	<0,5 при 1550 нм (тах)	<0,08 при 1550 нм (тип.)

Однако волокно LEAF™ имеет некоторое преимущество: диаметр модового поля у него на 1 мкм больше, чем у двух других волокон. Большой диаметр модового поля позволяет более удобно вводить излучение в ОВ, особенно это важно для современных DWDM-систем, где для этой цели используется сложная интегральная оптика, и увеличить на 2 дБ уровень мощности этого излучения.

4.5. Измерения излучения, проходящего через линейный тракт

Для определения параметров ВОСП (см. гл. 2) необходимо проводить различные измерения в проходящем и рассеянном свете. В проходящем свете измеряют [2]:

- мощности оптического излучения;
- различные виды затуханий (потерь);
- коэффициенты ошибок;
- параметры формы оптических импульсов.

4.5.1. Измерение мощности оптического излучения

Измерители оптической мощности. Мощность оптического излучения P может измеряться в единицах мощности (Вт) или в логарифмических единицах p (дБм) по отношению к мощности 1 мВт. Для этой цели применяют измерители оптической мощности или оптические ваттметры.

Измерители оптической мощности используются для определения мгновенных, средних и максимальных ее значений на выходах излучателя $P_{из}$ или ВТ (на входе ФПУ) $P_{ф}$.

Измеритель оптической мощности (рис. 4.6) состоит из:

- фотоприемника (ФПУ), который преобразует мощность оптического излучения в электрический сигнал (обычно фототок);
- усилителя фототока (УФТ), на выходе которого с помощью осциллографа можно наблюдать сигнал, пропорциональный мгновенному значению мощности;
- логарифматора (ЛОГ);
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- устройства отображения (УО).

При измерении средних значений мощности после УФТ устанавливают усредняющий фильтр нижних частот (ФНЧ), а при измерении максимальных значений — амплитудный детектор.

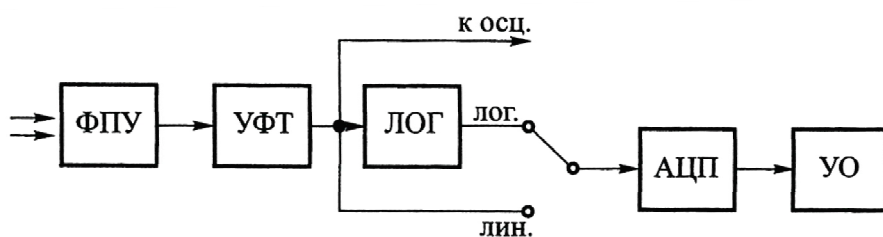


Рис. 4.6. Структурная схема измерителя оптической мощности

В качестве ФПУ могут использоваться фотоэлементы, фотоумножители, фоторезисторы, тепловые и сегнетоэлектрические приемники, однако чаще всего применяют PIN-фотодиоды.

ФПУ должен удовлетворять следующим требованиям:

- иметь фоточувствительную площадку, достаточную для регистрации всего потока излучения, выходящего из источника излучения или ОВ;
- иметь чувствительность, однородную по площади и мало зависящую от температуры, и характеристику преобразования линейную во всем диапазоне измеряемых мощностей;
- обладать малым уровнем шума, низким порогом реагирования, т.е. иметь малый уровень темнового тока.

Для длины волны $\lambda = 0,85$ мкм обычно используют кремниевые PIN-фотодиоды, для длин волн $\lambda = 1,3$ и $1,55$ мкм используют либо германиевые PIN-фотодиоды, либо PIN-фотодиоды на основе арсенида галлия, легированного индием [4]. Наилучшими параметрами: высокой линейностью, температурной стабильностью, широким динамическим диапазоном по линейности и по шумам (малый темновой ток) обладают кремниевые PIN-фотодиоды. К сожалению, они могут использоваться для измерений только с $\lambda = 0,85$ мкм. На больших λ применяют германиевые фотодиоды или фотодиоды на основе арсенида галлия, легированного индием.

В УФТ можно автоматически или вручную изменять коэффициент передачи для выбора диапазона измерения. Для получения результата измерения на УО в цифровой форме используется АЦП. Для вывода результата перед АЦП устанавливается ЛОГ, если его надо выразить в логарифмических единицах.

Измерители оптической мощности в сочетании с другими приборами могут использоваться для определения параметров ФПУ:

- чувствительности $P_{\phi \min}$;
- уровня перегрузки $P_{\phi \max}$;
- динамического диапазона D_{ϕ} ;

и параметров регенерационного участка ВОСП:

- вносимого затухания $a_{\text{вн}}$;
- энергетического запаса $\mathcal{E}_{\text{зап}}$.

Методы измерения вносимого затухания будут рассмотрены в п. 4.5.2.

Измерение параметров ФПУ. Для определения чувствительности ФПУ (рис. 4.7) кроме измерителя оптической мощности используют оптический attenuator с регулируемым затуханием и измеритель коэффициента ошибок (ИКО).

С помощью оптического attenuатора уменьшается уровень сигнала на входе ФПУ. При этом контролируется уровень средней мощности P_{ϕ} и коэффициент ошибок $k_{\text{ош}}$. За величину чувствительности принимают уровень сигнала $P_{\phi \text{ min}}$ на входе ФПУ, при котором $k_{\text{ош}}$ соответствует заданному уровню, например 10^{-9} .

Такая же процедура может использоваться для определения уровня перегрузки ФПУ $P_{\phi \text{ max}}$. Однако в этом случае находится не минимальный, а максимальный уровень входного сигнала, при котором коэффициент ошибок соответствует заданному уровню.

Динамический диапазон ФПУ определяется разностью полученных значений

$$D_{\phi} = P_{\phi \text{ max}} - P_{\phi \text{ min}}. \quad (4.1)$$

Измерение энергетического запаса. Под энергетическим запасом регенерационного участка понимают величину возможного увеличения затухания участка, при котором коэффициент ошибок не превосходит допустимого значения.

Этот параметр может быть определен по результатам измерений вносимого затухания $a_{\text{вн}}$, уровня выходной мощности излучателя $P_{\text{из}}$ и $P_{\phi \text{ min}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{зап}} = P_{\text{из}} - a_{\text{вн}} - P_{\phi \text{ min}}. \quad (4.2)$$



Рис. 4.7. Схема измерения чувствительности ФПУ

Максимально и минимально допустимые вносимые затухания на участке ВОСП вычисляются по формулам

$$a_{\text{вн max}} = P_{\text{из}} - P_{\text{ф min}}; \quad a_{\text{вн min}} = P_{\text{из}} - P_{\text{ф max}}. \quad (4.3)$$

4.5.2. Измерение вносимого затухания

Затухание a характеризует ослабление сигнала и измеряется обычно в логарифмических единицах: децибелах или неперах. При оптических измерениях затухание измеряют в соответствии с выражениями

$$a = 10 \lg \frac{P_0, \text{дБ}}{P_1}; \quad a = \ln \frac{P_0, \text{Нп}}{P_1}, \quad (4.4)$$

где P_0, P_1 — мощности сигналов на входе и выходе ОВ, ОК или любого компонента ВТ.

Отметим, что соотношения между децибелами и неперами при оптических измерениях отличаются от принятых в электрических измерениях и соотносятся как 1 : 4,34.

Общее или вносимое затухание ОВ можно разделить на собственное затухание и дополнительные потери (потери на входе и выходе излучения, потери, связанные с нарушениями геометрической формы ОВ и потери в соединениях строительных длин, а также вызванные недостатками монтажа).

Собственные потери. Собственное затухание обусловлено свойствами ОВ и возрастает с увеличением его длины. Для однородного ОВ можно рассчитать коэффициент затухания α — величину затухания на единицу длины

$$\alpha = \frac{a}{L}, \text{ дБ/км}, \quad (4.5)$$

где L — длина ОВ, км.

Собственные потери в ОВ обусловлены в основном двумя причинами:

- поглощением, которое определяется свойствами кварца, являющегося основным материалом для изготовления высококачественных ОВ, легирующих (полезных) добавок и вредных примесей;

- рассеянием, существенно зависящим от длины волны и технологии изготовления ОВ. Поглощение, возникающее в процессе распространения света в веществе, обусловлено потерями в материале ОВ.

Поглощение носит резонансный характер и дает для кварца пики затухания в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. В используемом диапазоне длин волн 0,80—1,6 мкм всплески поглощения у кварца отсутствуют.

При современных технологиях изготовления ВС наибольший вклад в поглощение вносят гидроксильные группы ОН (вода). Они дают мощный пик поглощения на длине волны 1,39 мкм, которая очень близка к длине волны нулевой материальной дисперсии кварца (~ 1,27 мкм).

В ОВ, изготовленных из плавленого кварца (8102), происходит линейное рассеяние проходящего света. Оно является фундаментальной (технологически неустранимой) причиной затухания в ОВ и носит название рэлеевское. Его особенностью является сильная зависимость коэффициента рассеяния α_s от длины волны λ , проходящего излучения

$$\alpha_s = \chi_s \lambda^{-4}, \quad (4.6)$$

где χ_s — коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ОВ равен 0,7—0,9 дБ·мкм⁴/км.

Кроме перечисленных, к собственным потерям можно отнести так называемые дополнительные потери, обусловленные случайно расположенными структурными дефектами ОВ, а также его микро- и макроизгибами. Наиболее существенный вклад в увеличение затухания вносят микроизгибы, радиус которых соизмерим с радиусом сердцевины ОВ.

Потери в стыках ОВ. На вносимое затухание смонтированного участка помимо собственного затухания в ОВ существенное влияние оказывает качество стыков, т.е. разъёмных и неразъёмных (сварки, склейки) соединений. Эти потери можно разделить на:

- обусловленные различием параметров, соединяемых ОВ (внутренние);
- обусловленные неточностью юстировки при соединении.

Их невозможно уменьшить при заделке волокон в соединитель или юстировкой перед сваркой. Основными причинами потерь в ОВ являются различия в параметрах показателей преломления сердце-

вин при соединении ОВ, их числовых апертур и диаметрах сердцевин (для многомодовых ОВ) или диаметров модовых полей (для одномодовых ОВ). Соединение ОВ с различными показателями преломления сердцевин показано на рис. 4.8. Потери из-за различия показателей преломления сердцевин являются следствием френелевского отражения на границе раздела двух сред. Для волокон со ступенчатым профилем при отсутствии зазора между ОВ потери составят:

$$a = -10 \lg \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \text{ дБ}, \quad (4.7)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления волокон.

Если излучение переходит из ОВ₁, имеющего числовую апертуру NA₁, в ОВ₂ с числовой апертурой NA₂, которая удовлетворяет условию (NA₁ > NA₂), то часть излучения из ОВ₁ выйдет в оболочку ОВ₂ и там рассеется. В этом случае (рис. 4.9) при отсутствии зазора между ОВ потери составят

$$a \approx \begin{cases} 20 \lg \frac{NA_1}{NA_2} \\ 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Неодинаковые диаметры сердцевин многомодовых ОВ или неодинаковые диаметры модовых полей одномодовых ОВ вызывают дополнительные потери. Потери возникают при переходе из ОВ₁ с большим диаметром в ОВ₂ с меньшим диаметром. Соединение ОВ с разными диаметрами сердцевин (модовых полей) показано на рис. 4.10.

Рассмотренные потери, кроме вызванных различием показателей преломления

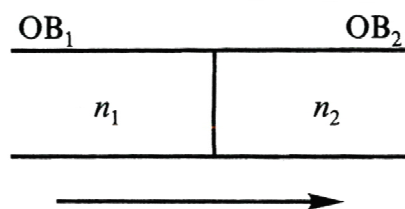


Рис. 4.8. Соединение ОВ с различными показателями преломления сердцевин

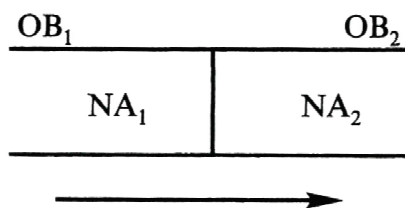


Рис. 4.9. Соединение ОВ с разными числовыми апертурами

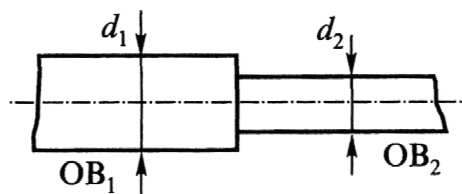


Рис. 4.10. Соединение ОВ с разными диаметрами сердцевин (модовых полей)

ломления, в первом приближении не зависящих от направления распространения света, от этого зависят.

В соответствии с рекомендациями G.651 [15] числовая апертура градиентных многомодовых ОВ должна удовлетворять условию $NA = 0,2 \pm 0,015$ мкм, а диаметр сердцевины $d = 50 \pm 3$ мкм. Расчеты по выражениям (4.7) и (4.8) показывают, что максимальные потери могут достигать 1 и 1,3 дБ соответственно. Для одномодовых ОВ со смещенной дисперсией в соответствии с рекомендациями G.653, предназначенных для работы на длине волны 1,55 мкм, диаметр модового поля должен удовлетворять условию $d = 8,4 \pm 0,5$ мкм. Максимальные потери, рассчитанные по формуле (4.8), могут достигать 1 дБ. Реальные отклонения указанных параметров, которые обеспечивают лучшие производители волокон, намного меньше рекомендаций G.651—G.655 [5]. Это обстоятельство, а также группирование сращиваемых ОВ, позволяет сваривать ОВ с потерями, составляющими порядка 0,01 дБ и изготавливать оптические разъемные соединители с потерями порядка 0,2—0,5 дБ.

Потери, обусловленные погрешностями юстировки и конструкциями соединителей, проявляются в разъемных и неразъемных соединениях. В разъемных соединениях они являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса оконцовывания ОВ и зависят от точности юстировки волокон при их заделке в наконечник соединителя (радиальное, угловое и осевое смещение), а также качества обработки (полировки) торцов соединяемых ВС, обычно вносящих негативный вклад.

Потери в неразъемных соединениях определяются точностью юстировки ВС в сварочном аппарате перед работой. Однако у современных сварочных аппаратов юстировка и управление процессом сварки ОВ автоматические, обеспечивающие минимальные потери. Поэтому связанные с ними потери в основном определяются различием в параметрах свариваемых ОВ.

Радиальное смещение осей соединяемых ОВ (рис. 4.11). Такое смещение приводит к тому, что часть энергии из ОВ₁ не попадает в ОВ₂. Потери не зависят от направления распространения света и при малых смещениях $h \ll d$ составляют:

$$a \approx 4,34 \frac{r}{d}, \quad (4.9)$$

где r — радиальное смещение

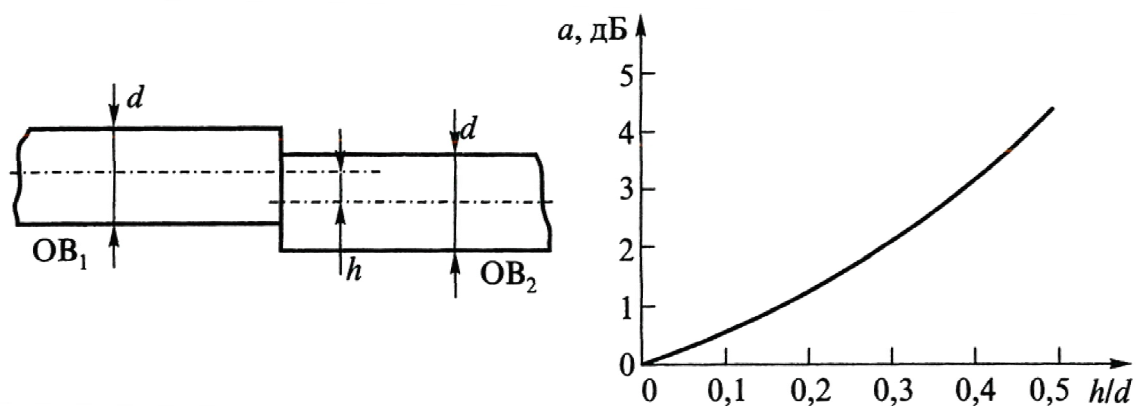


Рис. 4.11. Радиальное смещение осей ОВ

Угловое смещение осей сердцевин, соединяемых ОВ (рис. 4.12). Эти потери также не зависят от направления распространения света, и при малых угловых смещениях $\alpha \ll 2NA$ составляют

$$a \approx 2,17 \frac{\alpha}{NA}. \quad (4.10)$$

Осевое смещение торцов ОВ (рис. 4.13) может происходить только в разъёмных соединениях ОВ, а потери составляют

$$a = 17,4h \frac{NA}{d}, \quad (4.11)$$

где h — осевое смещение.

Приведенные формулы не являются точными и не учитывают всех физических явлений, происходящих на стыке ВС, но они позволяют примерно оценить необходимые точности юстировки при сварке и из-

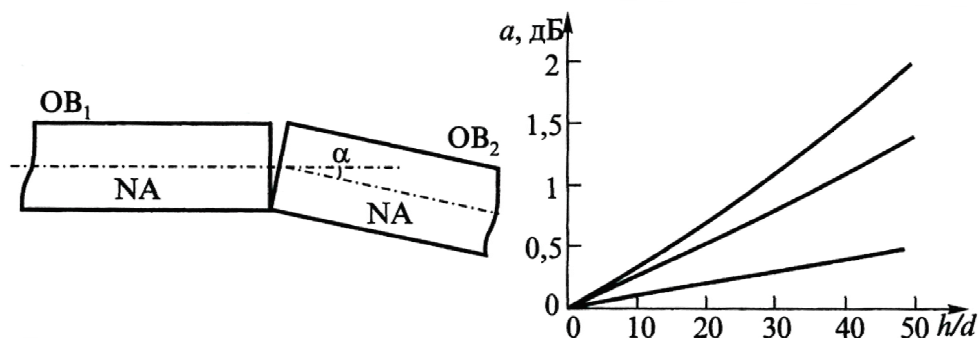


Рис. 4.12. Угловое смещение осей ОВ

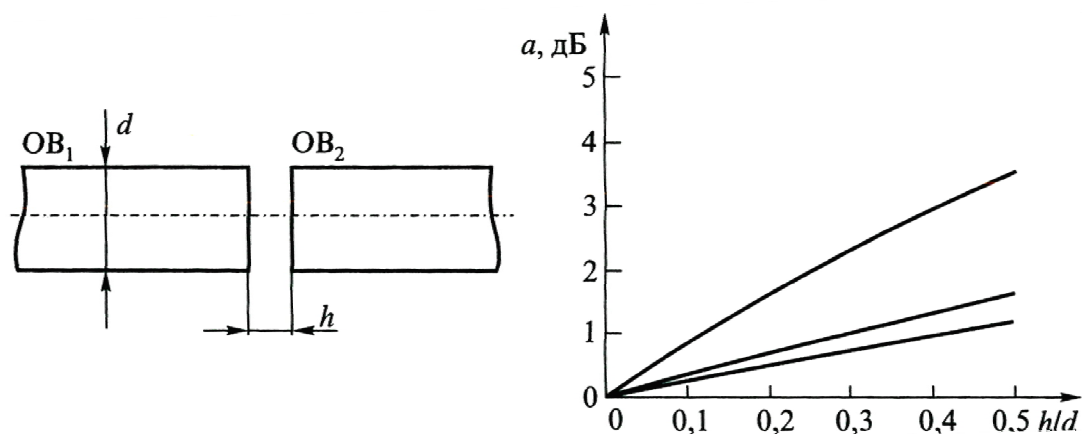


Рис. 4.13. Осевое смещение осей ОВ

готовлении оптических разъемов. Задаваясь потерями, равными 0,2 дБ, можно определить по выражениям (4.9)—(4.11) требования к юстировке градиентных многомодовых ОВ, изготовленных в соответствии с G.651—G.654 [5]. Максимально допустимые радиальное, осевое и угловое смещения составят 2,3 мкм; 3 мкм и 1° соответственно.

Измерение вносимого затухания методом сравнения уровней. Этот метод имеет несколько разновидностей в зависимости от конкретных условий. При научно-исследовательских лабораторных измерениях часто ставятся задачи определения зависимости коэффициента затухания от длины волны, технологических особенностей производства, температуры, механических напряжений, наличия ионизирующих излучений и т.п. Это требует создания сложных измерительных комплексов, включающих мощные неселективные источники излучения, монохроматоры, вычислительные устройства. Измерения проводятся на экспериментальных образцах ОВ, обычно сравнительно небольшой длины. Такие установки не пригодны для измерений в полевых условиях в процессе строительства и эксплуатации ВОЛП.

Надо отметить, что на практике чаще всего необходимо измерять либо полное вносимое затухание ОВ на строительной длине или на смонтированном участке, либо коэффициент затухания при известной длине ОВ. Эти измерения имеют много общего, но имеются и особенности.

Отечественные правила рекомендуют две разновидности метода сравнения уровней на входе и выходе ОВ (ОК):

- метод обрыва;
- метод вносимых потерь.

Первый метод, более точный, связан с разрушением испытуемого ОВ, который уменьшается на 3—5 м после каждого измерения. Его применяют для измерений коэффициента затухания на ОВ известной длины, не армированных оптическими соединителями (обычно на строительных длинах при входном контроле).

Второй метод применяют для измерения вносимых потерь на смонтированных участках, когда ОВ армированы оптическими соединителями.

Так как величина коэффициента затухания α зависит от средней длины волны λ , источника излучения, а также от ширины спектра источника излучения $\Delta\lambda$, то эти параметры должны быть точно известны (стандартизованы). В процессе измерения необходимо обеспечить постоянство мощности излучения, вводимого в ОВ, и неизменность модового состава на многомодовых ОВ.

Метод обрыва. Для измерений отбирают отрезки ОВ (ОК) с известной длиной L . Необходимо помнить, что погрешность при определении коэффициента затухания увеличивается с уменьшением длины ОВ. Измеряемый ОВ (ОК) выдерживают в нормальных климатических условиях не менее 3 ч (ГОСТ 20.57.408-81). В соответствии с ГОСТ 26814-86 для подготовки образцов необходимо:

- оба конца измеряемых ОВ освободить от защитных покрытий, входной — на расстоянии не менее 1 м, выходной — на расстоянии не менее 0,5 м;
- концы каждого ОВ освободить на длине 10—50 мм от первичных и вторичных защитных покрытий (оболочек);
- торцевые поверхности ОВ на обоих концах ОК обработать так, чтобы они были ровными, перпендикулярными оси ОВ и не имели сколов и трещин (перпендикулярность сколов и отсутствие дефектов определяют под микроскопом с увеличением не менее $\times 20$).

Упрощенная схема установки для измерения по методу обрыва представлена на рис. 4.14. Источник излучения (ИИ) через смеситель мод (СМ), фильтр оболочечных мод (ФОМ) и устройство ввода (УВ) освещает входной торец ОВ. Прошедшее ОВ излучение поступает на фотоприемник (ФП), электрический сигнал с которого поступает на регистрирующий прибор (РП).

Измерение проводится следующим образом. С помощью УВ проводят юстировку входного торца измеряемого ОВ по максимуму сигнала на входе ФП, фиксируют положение входного торца и ре-

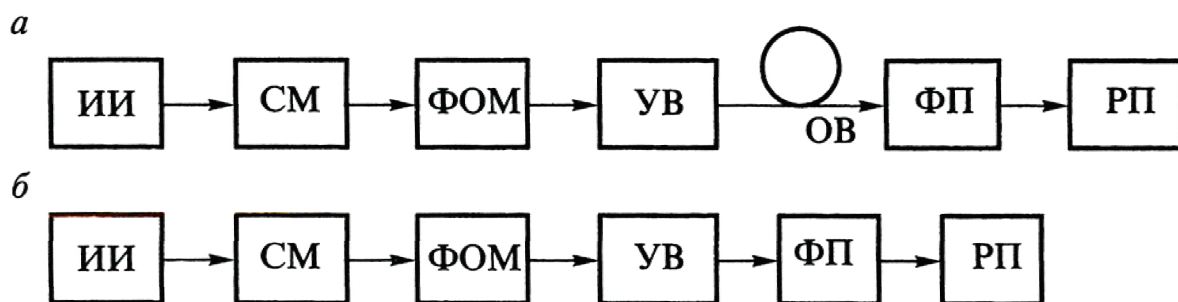


Рис. 4.14. Схема установки для проведения измерения по методу обрыва:
а — измерение уровня оптической мощности после оптического волокна;
б — измерение уровня оптической мощности после устройства ввода

гистрируют значение выходного сигнала P_1 . Не изменяя положения *ОВ* в устройстве ввода, от выходного конца измеряемого *ОВ* обламывают отрезок длиной 0,5—3 см, вновь обрабатывают выходной торец *ОВ* и повторяют измерение P_1 . Количество измерений определяют, исходя из допустимой погрешности измерения S_{dp} , но не менее трех раз. Эта процедура позволяет исключить грубые ошибки из-за плохого состояния выходного конца исследуемого *ОВ*.

Не изменяя положения *ОВ* в устройстве ввода, обламывают измеряемый *ОВ* после *ФОМ* на расстоянии $1 \pm 0,2$ м от входного торца. Подготавливают (обрабатывают) выходной конец короткого отрезка *ОВ*. Регистрируют мощность излучения P_2 , выходящего из короткого *ОВ*. Повторяют измерения для исключения грубых погрешностей.

Результаты измерений оформляются протоколом, в котором указывают:

- результаты измерения затухания и коэффициента затухания в каждом *ОВ*;
- длину волны и спектральную ширину источника излучения;
- марку и длину *ОК*;
- тип, заводские номера и дату поверки (аттестации) использованного оборудования;
- погрешность результата измерения при выбранных доверительных границах.

Главным достоинством данного метода является исключение (значительное уменьшение) погрешности от неопределенности уровня введенной в *ОВ* мощности излучения.

В качестве *ИИ* для измерения затухания на одной длине волны могут использоваться светодиоды, полупроводниковые лазеры, а для

измерений затухания в широком спектре длин волн — лампы накаливания или газоразрядные в сочетании с монохроматором. К источникам излучения предъявляются следующие требования:

- мощность излучения, которую можно ввести в ОВ, должна быть достаточно большой, так как с ее увеличением возрастает динамический диапазон измерения полного затухания;
- источник должен иметь строго определенную и стабильную длину волны и узкую полосу излучения, обеспечивающие единство измерений разными приборами;
- средняя мощность излучения и длина волны источника должны мало зависеть от времени и окружающей температуры, достигаемых использованием систем стабилизации температуры излучателя и выходной мощности.

В многомодовых ОВ затухания различных мод отличаются [2]. Обычно моды более высокого порядка, которые проходят по ОВ больший путь, имеют большее затухание. Измерению обычно подлежит некоторое среднее затухание, обусловленное всеми возможными модами. В связи с различным затуханием мод измеренные их величины зависят от распределения энергии проходящего излучения между разными модами. Для единства измерений на одних и тех же многомодовых ОВ необходимо обеспечить в них так называемое равновесное распределение мод (РРМ), обычно устанавливаемое в ОВ при любых условиях ввода на расстоянии, равном длине установления $L_{уст}$, которое для различных ОВ может составлять от сотен метров до нескольких километров. Это особенно важно при определении коэффициента затухания на малых (меньше 1 км) длинах ОВ. Для формирования РРМ могут использоваться дополнительные ОВ с длиной $L > L_{уст}$ или специальные смесители мод (СМ) [7].

При измерении коэффициента затухания α на коротких участках ОВ возникает также погрешность, обусловленная модами оболочки, вытекающими модами. Она может быть особенно существенной для одномодовых ОВ. Моды оболочки возникают, если источник излучения имеет излучающую площадку, превышающую размеры сердцевины ОВ, и ширина диаграммы направленности источника превышает апертурный угол ОВ. Оболочечные моды, хотя и имеют значительно больший коэффициент затухания по сравнению с модами сердцевины (модами распространения), тем не менее, способны распространяться на большие расстояния. При измерении мощ-

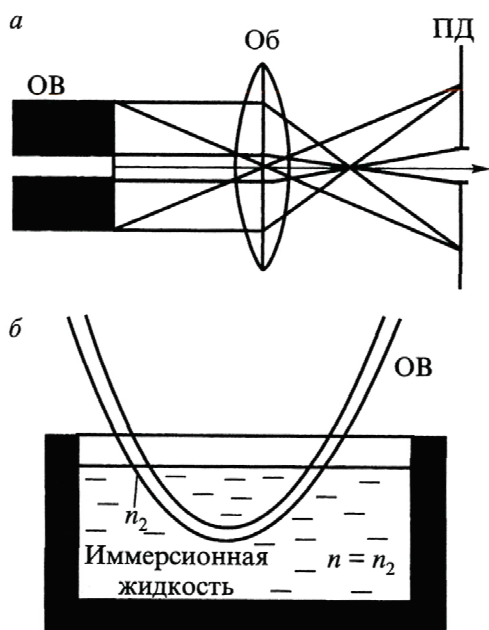


Рис. 4.15. Способы подавления оболочечных мод:
 а — с помощью объектива (Об) и полевой диафрагмы (ПД); б — фильтром оболочечных мод на основе иммерсионной жидкости

ности источника излучения через короткий ОВ, например поводок, приемник регистрирует оболочечные моды. Так как это излучение является фактически посторонним при измерении коэффициента затухания (регистрации подлежат только направляемые моды), то возникает погрешность измерения этого коэффициента. Данная погрешность может быть очень большой в одномодовых ОВ, где с ней борются, применяя объектив (Об), формирующий увеличенное изображение торца ОВ, и устанавливая в плоскости изображения полевую диафрагму (ПД), отсекающую оболочечные моды перед приемной площадкой ФП (рис. 4.15, а).

Чаще для борьбы с оболочечными модами используют фильтр оболочечных мод (ФОМ) (рис. 4.15, б) [2], который обычно представляет собой отрезок

ОВ, освобожденный от защитных покрытий, сложенный петлей (изогнутый), радиусом порядка 10 см и помещенный в кювету с иммерсионной жидкостью, которая смачивает оптическую оболочку ОВ на длине 5—10 см. Эта жидкость должна иметь показатель преломления $n_i = n_2$, где n_2 — показатель преломления оболочки. Тогда оболочечные моды без отражения на границе оболочка—жидкость будут переходить в жидкость, поглощаться и рассеиваться в ней.

О серийном изготовлении смесителей мод и фильтров мод оболочки для измерений по методу обрыва нет информации. Их надо изготавливать самостоятельно.

Измерение вносимых потерь. Метод основан на последовательном измерении мощности оптического излучения на выходе измеряемого ОВ и выходе источника излучения, который присоединяется к приемнику излучения непосредственно или с помощью вспомогательного ОВ, армированного оптическим разъемом, так же как и измеряемое ОВ.

Эти разъемы должны иметь известный уровень потерь α_p при соединении и длину оптического волокна L . При подготовке к измерениям необходимо протереть торцы всех соединяемых соединителей спиртом.

Для измерений (рис. 4.16) используются источник излучения, выходной оптический разъем которого установлен на передней панели излучателя, и пачкорт (короткий отрезок ОВ, армированный разъемом и заключенный в гибкую защитную оболочку) с известным уровнем потерь.

Проводятся два измерения. При первом пачкорт непосредственно подключается к приемнику и измеряется уровень оптической мощности P_0 . При втором измерении вместо пачкорта между источником и приемником излучения включается измеряемое ОВ.

Вносимые потери $A_{\text{вн}}$ определяют по формуле

$$A_{\text{вн}} = 10 \lg \frac{P_{\text{к}}}{P_0}, \quad (4.12)$$

где $P_{\text{к}}$ — значение оптической мощности на выходе измеряемого компонента;

P_0 — значение оптической мощности на выходе источника излучения или короткого отрезка ВОК.

Результаты измерений, в которые входят затухания пачкорта, оформляются протоколом.

При измерении вносимых потерь обычно используют оптические тестеры (ОТ). Они предназначены для измерений в процессе строительства и эксплуатации ВОЛП, при которых необходимо использовать отдельные, разнесенные в пространстве приемник и источник излучения. Повышение точности и измерительных возможностей достигается использованием оптических тестеров (оптических мультиметров), у которых в одном корпусе размещены источник и приемник излучения. Это позволяет проводить измерения затухания смонтированного участка ВТ одновременно в двух ОВ, а в каждом из них — во встречных направлениях, повысить точность измере-

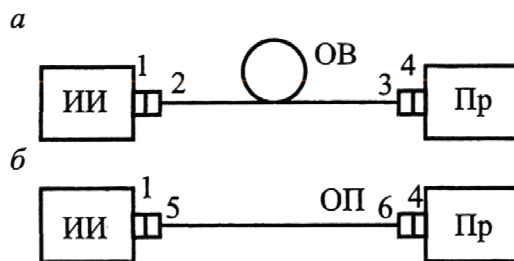


Рис. 4.16. Схема установки для измерения вносимых потерь:

а — приемник включен на выходе измеряемого ОВ; б — приемник включен на выходе пачкорта (ОП) с известным уровнем потерь

ния благодаря возможности калибровать источники излучения по собственным приемникам. Перечень средств измерений электросвязи для ВОЛП приведен в табл. 10 [8].

Проведение измерений на протяженной линии осуществляют два человека. Для координации их действий часто используют устройство

Таблица 10

**Перечень средств измерений для ВОЛП,
используемых на телекоммуникационных сетях России**

№ сертификата Минсвязи Рос- сии (или опера- тивный номер)	Тип СИЭ	Наименование	Фирма- производитель	Номер в Госреестре России
ОС/1-КИА-138 (до 2.11.2001) только для про- давца-заявителя на партию	AQ2150 с оп- тическими бло- ками AQ2751, AQ2752, AQ4250, AQ4251	Оптический мультиметр	Ando Electric Co., Ltd., Япония. Зая- витель — ООО «Те- леком Комплект Сервис», Москва	18267-99 (на пар- тию)
ОС/1-КИА-154 (до 14.12.2001) только для про- давца-заявителя	CMA40	Измеритель расстояния до места повреж- дения оптиче- ского волокна	GN NetTest (Fiber Optic Division), США. Заявитель — ЗАО «Сайрус Кор- порейшн», Москва	19748-00
ОС/1-КИА-164 (до 01.02.2002)	FOT-10A, FOT- 20A, FOT-30A, FOT-90A, FOT-920, FOT-700	Оптические тестеры	EXFO Electro- Optical Engineering, Канада	Нет
ОС/1-КИА-216 (до 27.12.2002) только для про- давца-заявителя	Серия GN 6025	Тестеры опти- ческие порта- тивные	GN NetTest (Fiber Optic Division), США. Заявитель — ЗАО «Сайрус Сис- теме Корпорейшн», Москва	19751-00
ОС/1-КИА-219 (до 10.01.2003)	ПТ	Тестер опти- ческий	ЗАО «Перспектив- ные технологии», С-Петербург	18404-99
ОС/1-КИА-235 (до 21.02.2003)	FOT-10A, FOT- 20A, FOT-30A, FOT-90A, FOT-920, FOT-700, BRT-320A	Оптический тестер	EXFO Electro- Optical Engineering, Канада	Нет

№ сертификата Минсвязи Рос- сии (или опера- тивный номер)	Тип СИЭ	Наименование	Фирма-производитель	Номер в Госреестре России
ОС/1-КИА-270 (до 01.2004)	AQ2150	Оптический мультиметр	Ando Electric Co., Ltd., Япония. Заявитель — ООО «Комплектация Телеком», Москва	18267-99
ОС/1-КИА- 18.5(126) (до 30.01.2004)	Серия GN 6025	Тестеры опти- ческие порта- тивные	GN NetTest (Fiber Optic Division), США. Заяви- тель — ЗАО «Сайрус Системе Корпо- рейшн», Москва	19751-00
Оптические измерители мощности				
ОС/1-КИА-28 (до 01.08.2000)	K2410	Измеритель мощности опти- ческого излуче- ния	Siemens, Германия	Нет
ОС/1-КИА-56 (до 01.08.2001)	FOD 1202	Измеритель уровня опти- ческой мощ- ности	ООО «КБ волоконно- оптических приборов», Москва	19638-00
ОС/1-КИА-57 (до 01.08.2001)	Алмаз-21	Измеритель средней мощ- ности оптиче- ского излучения	ФУП ЛОНИИР, С-Петербург	17796-98
ОС/1-КИА-87 (до 01.09.2000) (на конкретные заводские №№)	SI7745	Измеритель мощности опти- ческий	Wavetek, Австрия. Зая- витель — NEC Corpo- ration, Москва	Нет
ОС/1-КИА-90 (до 01.09.2000) (на конкретные заводские №№)	ML9002A	Измеритель мощности оптического из- лучения	Anritsu, Япония. Зая- витель — NEC Corpo- ration, Москва	16711-97 (на кон- кретные заводские №№)
ОС/1-КИА-94 (до 01.11.2000) (на конкретные заводские №№)	OTS 7940	Измеритель мощности оптического из- лучения	Wavetek Shlumberger, Франция. Заявитель — NEC Corporation, Мо- сква	15603-96
ОС/1-КИА-133 (до 31.08.2001) только для продавца- заявителя	LP-5000	Измерители оп- тической мощ- ности	GN NetTest (Fiber Optic Division), США. Заяви- тель — ЗАО «Сайрус Системе Корпо- рейшн», Москва	19750-00

№ сертификата Минсвязи Рос- сии (или опера- тивный номер)	Тип СИЭ	Наименование	Фирма-производитель	Номер в Госреестре России
Оптические измерители мощности				
ОС/1-КИА-137 (до 12.10.2003)	OLP-10, OLP-15, OLP-15A, OLP-15B	Измерители мощности опти- ческого излуче- ния	Wavetek Wandel Golter- mann Eningen GmbH & Co., Германия	15810-96
ОС/1-КИА-165 (до 15.02.2004)	OLP-5, OLP-6	Измерители мощности опти- ческого излуче- ния	Wavetek Wandel Golter- mann Eningen GmbH & Co, Германия	Нет
ОС/1-КИА-185 только для опе- ратора- заявителя на весь срок службы ТСЭ	FOT-92A- RS	Измерители мощности опти- ческого излуче- ния	EXFO Electro-Optical Engineering, Канада. Заявитель — ЗАО «Макомнет»,	Нет
ОС/1-КИА-207 (до 8.11.2004)	OLP-15C	Измеритель мощности опти- ческого излуче- ния	Acteraa Eningen GmbH, Германия. Заявитель — Представительство ООО «Актерна Авст- рия ГмбХ», Москва	Нет
ОС/1-КИА-226 (до 21.02.2005)	Photom 230 и 235	Оптический из- меритель мощ- ности	Naktronics Co., Ltd, Япония	Нет
ОС/1-КИА-229 (до 21.02.2005)	Pho- tom211A	Оптический из- меритель мощ- ности	Naktronics Co., Ltd, Япония	Нет
ОС/1-КИА-258 (до 8.08.2005)	OLP- 16C/18C	Измеритель мощности опти- ческого излуче- ния	«Acterna Eningen GmbH», Германия. Заявитель — Пред- ставительство ООО «Актерна Австрия ГмбХ», Москва	22719-02
ОС/1-КИА-267 (до 15.11.2003)	АЛМАЗ-21	Измеритель средней мощно- сти оптического излучения	ФГУП ЛОНИИР, С.-Петербург	17796-98
Источники оптического излучения				
ОС/1-КИА-55 (до 01.08.2001)	FOD 2107, 2108, 2109, 2110	Малогабаритные источники опти- ческих сигналов	ООО «КБ волоконно- оптических приборов», Москва	19639-00

№ сертификата Минсвязи России (или оперативный номер)	Тип СИЭ	Наименование	Фирма-производитель	Номер в Госреестре России
Источники оптического излучения				
ОС/1-КИА-89 (до 01.09.2000) (на конкретные заводские №№)	SI7748	Источник оптического излучения	Wavetek, Австрия. Заявитель — NEC Corporation, Москва	Нет
ОС/1-КИА-93 (до 01.11.2000) (на конкретные заводские №№)	OTS 7946	Источник излучения оптический измерительный	Wavetek Shlumberger, Франция. Заявитель — NEC Corporation, Москва	15604-96
ОС/1-КИА-96 (до 01.11.2002)	«Алмаз-11»	Источник оптического излучения	ФУП ЛОНИИР, С-Петербург	18419-99
ОС/1-КИА-137 (до 12.10.2003)	OLS-8, OLS-10, OLS-15, OLS-16, OLS-17	Источники излучения оптические	Wavetek Wandel Goltermann Eningen GmbH & Co., Германия	15807-96

служебной связи по двум ОВ. Существуют также устройства дуплексной служебной связи по одному ОВ, которые своим динамическим диапазоном перекрывают всю длину участка регенерации на одномодовом волокне. Некоторые оптические тестеры помимо измерения вносимого затухания выполняют также функцию оптического телефона.

Погрешности измерения вносимых потерь обусловлены использованием коннекторов, параметрами измерителя мощности, влиянием поляризации, оптических помех, спектральными характеристиками источника, использованием несовместимых ОВ.

4.5.3. Измерение коэффициента ошибок

Одним из наиболее важных интегральных параметров ВОСП является коэффициент ошибок, который служит экспериментальной оценкой вероятности ошибки в линейном тракте ВОСП.

Статистические параметры и нормы, характеризующие битовые ошибки, делятся на долговременные и оперативные. Долговременные определяются рекомендациями ITU-TG821 и G826, а оперативные — M.2100, M.2110 и M.2120, при этом, согласно M.2100, качество цифрового тракта по уровню ошибок делят на три категории: нор-

мальное — при $BER < 10^{-6}$, пониженное — $10^{-6} \leq BER < 10^{-3}$ (предварительное состояние); неприемлемое — $BER \geq 10^{-3}$ (аварийное состояние), где BER (Bit Error Rate) — коэффициент ошибок по битам.

Параметры ошибок: секунда с ошибками (errored second ES) — секундный интервал, содержащий хотя бы один ошибочный бит; секунда пораженная ошибками (severely errored second SES) — секундный интервал с $BER \geq 10^{-3}$.

Данные параметры ошибок должны оцениваться в течение времени готовности (available time), отсчет которого начинается с первой секунды из десяти следующих друг за другом секунд, в каждой из которых $BER < 10^{-3}$.

ITU-T M2100 регламентирует нормы качества (performance objectives, PO), которые зависят только от скорости передачи и приводятся для условного эталонного соединения (hypothetical reference connection, HRC) длиной 27 500 км. При этом нормы качества распределяются по пяти участкам соединения соответствующей категории качества. В эталонной модели такого тракта выбирается центральный участок высокого качества длиной 25 000 км, на который приходится только 40 % от допустимой величины общей нормы качества, что в пересчете на 1 км дает 0,0016 % на км. Остальные четыре участка (2 — среднего качества и 2 — с приемлемым качеством) длиной 2·1250 км расположены по обе стороны от центрального.

Нормы качества на цифровые тракты и каналы подразделяются на вводимые в эксплуатацию и эксплуатируемые, причем первые распространяются и на каналы, принимаемые после ремонта.

Для анализа результатов, полученных в процессе измерений, используются предельные значения норм, которые соответствуют числу событий (ES, SES).

При соответствии результатов измерений норме цифровой тракт может быть введен в эксплуатацию, а при превышении нормы в обязательном порядке требуется повышение качества испытываемого цифрового тракта, т.е. проведение корректирующих действий с повторными измерениями. Если значение ES или SES лежит в пределах нормы, цифровой тракт может быть введен в эксплуатацию условно или временно при продолжении измерений в течение 7 суток.

Данный подход к оценке качества цифровых систем передачи позволяет сократить время измерений и получить общую норму цифрового тракта суммированием норм отдельных участков [19].

Основными причинами ошибок являются флуктуационные шумы ФПУ и его перегрузка входным оптическим сигналом. Шумы ФПУ, которые определяются его схемой, типом ФП и скоростью передачи данных в ВОСП, приводят к уменьшению отношения сигнал/ шум на выходе ФПУ и определяют максимально допустимое затухание в линейном тракте при данной мощности излучателя. Перегрузка ФПУ приводит к возникновению межсимвольных искажений и увеличению вероятности ошибки. Межсимвольные искажения определяют минимально допустимое затухание в линейном тракте при данной мощности излучателя.

Вероятность ошибок при равновероятной передаче 1 и 0 можно представить в виде:

$$P_{\text{ош}} = 0,5[P(0/1) + P(1/0)], \quad (4.13)$$

где $P(0/1)$ — вероятность приема 0 при передаче 1 (вероятность пропуска единицы);

$P(1/0)$ — вероятность приема 1 при передаче 0 (вероятность приема ложной единицы).

Коэффициент ошибок определяется отношением числа ошибочных символов m , зафиксированных на интервале времени измерения, к общему числу принятых символов n

$$k_{\text{ош}} = \frac{m}{n}. \quad (4.14)$$

В соответствии с международным стандартом на цифровые телефонные каналы связи в линии (Рекомендация МСЭ-Т G.821) протяженностью 2500 км допускается не более двух ошибок при передаче 10^7 бит информации. Это означает, что для каждой 10 км линии связи средняя вероятность ошибки должна поддерживаться на уровне $0,8 \cdot 10^{-9}$. В современных ВОСП коэффициент ошибок лежит в пределах $10^{-9} \text{ — } 10^{-12}$.

Измерение коэффициента ошибок или контроль за его значениями необходимы при измерении параметров ФПУ и ВОСП. Выше рассматривались методы измерения чувствительности, уровня перегрузки и динамического диапазона ФПУ, предусматривающие определение коэффициента ошибок в линейном тракте.

Измерение коэффициента ошибок в цифровых ВОСП осуществляется двумя методами:

- побитным сравнением единичных элементов принятого цифрового сигнала с аналогичным посланным измерительным цифровым

сигналом от генератора псевдослучайной последовательности (ПСП);

- выявлением нарушений алгоритма формирования кода в принятом цифровом сигнале.

Приборы, в которых ошибки обнаруживаются при поэлементном сравнении переданного и принятого сигналов (первый метод), являются измерителями коэффициента ошибок первого типа ИКО-1. Измерение коэффициента ошибки методом посимвольного сравнения с помощью ИКО-1 предполагает обязательный перерыв связи и проводится в процессе пусконаладочных, ремонтных и регламентных работ.

Приборы, в которых ошибки выявляются при обнаружении нарушений алгоритма кода в принятом сигнале (второй метод), являются измерителями коэффициента ошибок второго типа ИКО-2, входят в состав штатной аппаратуры ЦСП и позволяют проводить измерения коэффициента ошибок без прерывания связи. Принцип работы такого прибора (ИКО-2) основан на определении числа импульсов, нарушающих структуру линейного кода. Число нарушений, соотнесенное с общим числом импульсов, прошедших линейный тракт, определяет коэффициент ошибки.

Время, необходимое для измерения коэффициента ошибок $T_{\text{изм}}$ определенной величины с заданной доверительной вероятностью p и точностью измерений α , определяется выражением

$$T_{\text{изм}} = \frac{t_{\beta}^2}{\alpha^2 F k_{\text{ош}}}, \quad (4.15)$$

где F — скорость передачи информации, бит/с; а значения в зависимости от p приведены ниже в табл. 11.

Измерения с помощью ИКО-1 проводятся двумя способами: «по шлейфу» и «по направлению». При измерениях «по шлейфу» генератор испытательного сигнала и управляемый им анализатор кодовой последовательности находятся на одном конце тракта, а «шлейф» создается

Таблица 11

Значение параметра t_{β} в зависимости от заданной доверительной вероятности β

β	0,8	0,9	0,95
t_{β}	1,282	1,643	1,960

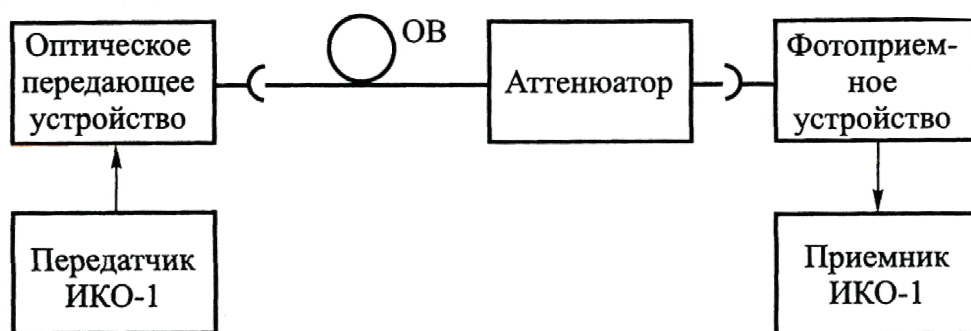


Рис. 4.17. Схема измерения энергетического запаса

в регенераторе либо соединением соответствующих волокон. В случае измерения «по направлению» генератор испытательного сигнала и анализатор находятся на разных концах тракта, при этом в анализаторе вырабатывается сигнал, аналогичный испытываемому сигналу генератора и синхронный с входным сигналом.

ИКО-1 может использоваться вместе с аттенюатором для определения энергетического запаса регенерационного участка без контроля оптической мощности. Схема измерения показана на рис. 4.17. Эта схема отличается от схемы измерения параметров ФПУ (рис. 4.7) тем, что оптический аттенюатор включен последовательно с оптическим линейным трактом (в точках S или R). Величина энергетического запаса определяется затуханием аттенюатора, при котором значение коэффициента ошибок равно допустимой величине.

4.5.4. Измерение параметров, характеризующих форму оптических импульсов

Параметры, определяющие форму оптических импульсов на выходе излучателя в точке S и на входе ФПУ в точке R , обычно измеряют с помощью глаз-диаграммы [2]. Для контроля за формой импульса используют шаблоны, которые совмещают с ней. Схема измерения таких параметров по глаз-диаграмме представлена на рис. 4.18. Импульсы от тактового генератора (ТГ) с частотой ВОСП поступают на генератор псевдослучайной последовательности (ГПСП), управляющий источником излучения (ИИ). Оптические импульсы с помощью ФПУ преобразуются в напряжение, поступающее на вход Y осциллографа (ОСЦ). На вход C синхронизации ОСЦ поступают импульсы от ТГ. Длительность развертки обычно выбирается равной двум периодам ТГ. При этом на экране одновремен-

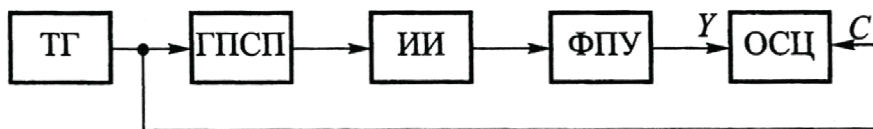


Рис. 4.18. Схема получения глаз-диаграммы

но можно наблюдать всевозможные формы импульсов. Их количество определяется числом элементов в одном периоде ПСИ, который выбирается в соответствии с используемой в ВОСП системой кодирования (наибольшим числом подряд идущих единиц и нулей).

Анализ глаз-диаграммы позволяет определять значительное количество параметров формы импульсов:

для излучателя в точке S :

- длительность и форму импульса;
- длительности переднего и заднего фронтов;
- относительную ширину глаз-диаграммы;
- коэффициент гашения;

для приемника в точке R :

- длительность и форму импульса;
- длительности переднего и заднего фронтов;
- относительную ширину глаз-диаграммы.

Сопоставление результатов измерения по глаз-диаграмме в точках S и R позволяет оценить дисперсионные искажения в линейном тракте (уширение импульса).

4.6. Измерения излучения, рассеянного в линейном тракте

4.6.1. Основы оптической рефлектометрии

Наиболее универсальным и информативным методом измерений параметров ОВ, ОК и ВТ является метод обратного рассеяния (МОР). Приборы, основанные на нем, называются *оптическими рефлектометрами* (ОР). Впервые идею использования обратного рэлеевского рассеяния в кварцевых ОВ при их зондировании короткими оптическими импульсами для исследования ОВ предложили американские ученые Барноски и Персоник [16]. Для импульсных ОР в зарубежной литературе принята аббревиатура OTDR (Optical Time Domain Reflectometr — оптический рефлектометр во временной области).

Упрощенная схема ОР представлена на рис. 4.19 [2]. Короткий оптический импульс мощного лазера через одно плечо направленного ответвителя (НО) поступает в исследуемый ОВ. Обратно на вход ОР приходят оптические импульсы, отраженные от локальных неоднородностей исследуемого ОВ, называемые френелевскими отражениями. Через НО они поступают на вход ФПУ. В НО происходят потери при вводе излучения от ИИ в ВТ и при выводе излучения из ВТ на ФПУ.

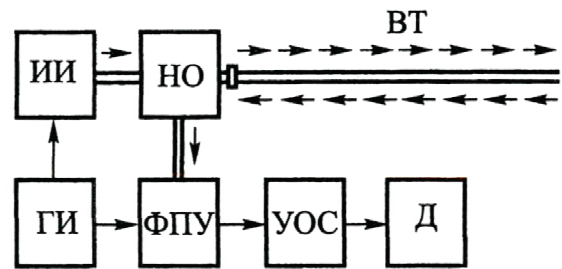


Рис. 4.19. Упрощенная структурная схема оптического рефлектометра:

ИИ — источник излучения;
НО — направленный ответвитель;
ВТ — исследуемый волоконный тракт; ГИ — генератор импульсов;
ФПУ — фотоприемное устройство;
УОС — устройство обработки сигнала; Д — дисплей

Коэффициент оптических потерь $K_{\text{оп}}$ обычно менее 0,25. Если в ОВ вводится мощность P_0 , коэффициент отражения от неоднородности равен R , то мощность отраженного импульса P_r , приходящего на вход ОР с учетом коэффициента затухания ОВ α и расстояния до неоднородности l , составляет

$$P_r = P_0 R K_{\text{оп}} 10^{-\frac{\alpha l}{5}}. \quad (4.16)$$

Причем длительность отраженных импульсов без учета дисперсии будет равна длительности зондирующего импульса $t_{\text{и}}$. Временной интервал t между зондирующим и отраженным импульсами определяется эквивалентным показателем преломления сердцевины ОВ и расстоянием l до неоднородности

$$t = \frac{2ln}{c}, \quad (4.16)$$

где c — скорость света в вакууме;

n — коэффициент преломления сердечника ОВ.

Проходящий по ОВ зондирующий импульс рассеивается в любом сечении ОВ и в таком виде распространяется равномерно во все стороны. Это рассеяние называют рэлеевским и его невозможно ус-

транить технологически при изготовлении ОВ. Оно является линейным и доля рассеянного излучения (коэффициент рассеяния α_s) не зависит от обычно используемых мощностей зондирующих импульсов. Проходящий по ОВ оптический импульс длительностью t_n одновременно вызывает рассеяние с участка ОВ протяженностью

$$\Delta l = \frac{ct_n}{2n_1}, \quad (4.17)$$

где c — скорость света в вакууме.

Часть рассеянного излучения возвращается к ОР. Она определяется фактором обратного рассеяния G , который зависит от апертурных свойств ОВ. Например, при ступенчатом профиле показателя преломления фактор обратного рассеяния составляет для МВС и ОВС соответственно

$$G = \frac{NA^2}{4n_1^2}, \quad G = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{n_1 w^2}. \quad (4.18)$$

Для мощности излучения, рассеянного с участка протяженности Δl , расположенного на расстоянии l от ОР, и пришедшего к его входу, можно записать

$$P_s = P_0 K_{\text{оп}} \alpha_s G \Delta l 10^{-\frac{\alpha l}{5}}. \quad (4.19)$$

Совокупность рассеянного и отраженного излучения из исследуемого ВТ, поступившего на вход ОР, называют *сигналом обратного рассеяния* (СОР). СОР через второе плечо НО поступает на высокочувствительное ФПУ. После усиления в нем и выделения СОР из шумов ФПУ с последующим логарифмированием в устройстве обработки сигнала (УОС) преобразованный СОР как функция времени задержки (или расстояния) отображается в графической форме в виде рефлектограммы на экране дисплея (Д).

Принимая некоторое значение оптической мощности P_n за нулевой уровень (0 дБ), для уровней обратно рассеянного Y_S и отраженного Y_R сигналов в

зависимости от расстояния l и временного интервала t между зондирующим сигналом и СОР можно записать выражения

$$\begin{aligned}
 Y_S &= 5\lg \frac{P_0}{P_H} + 5\lg K_{\text{оп}} + 5\lg(\alpha_S G \Delta l) - \alpha l = \\
 &= 5\lg \frac{P_0}{P_H} + 5\lg K_{\text{оп}} + 5\lg \frac{\alpha_S G c t_{\text{и0}}}{2n_1} + 5\lg \frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{и0}}} - \alpha \frac{ct}{n_1}; \\
 Y_R &= 5\lg \frac{P_0}{P_H} + 5\lg R - \alpha l = 5\lg \frac{P_0}{P_H} + 5\lg R - \alpha \frac{ct}{n_1}, \quad (4.20)
 \end{aligned}$$

где $t_{\text{и0}}$ — длительность зондирующего импульса, при которой нормируется относительный уровень СОР в ближней зоне ВТ

$$Y_{S0} = 5\lg \frac{\alpha_S G c t_{\text{и0}}}{2n_1}. \quad (4.21)$$

Из выражения (4.20) следует, что СОР возрастает с увеличением мощности P_0 и длительности $t_{\text{и}}$ зондирующего импульса, т.е. с увеличением его энергии, а также с уменьшением оптических потерь.

В табл. 12 приведены типичные значения относительного уровня СОР в ближней зоне ВТ при длительности зондирующего импульса 1 нс.

Типичная рефлектограмма СОР для ВТ приведена на рис. 4.20. На

Таблица 12

Типичные значения относительного уровня сигнала обратного рассеяния в ближней зоне волоконного тракта при длительности зондирующего импульса 1 нс

Тип ОВ	Длина волны, мкм	Y_{S0} , дБ
МВС	0,85	-35
	1,3	-37,5
ОВС	1,31	-39,5
	1,55	-40,5

ней можно выделить однородные участки (2) ВТ (без неоднородностей) с постоянным коэффициентом затухания α , на которых СОР после логарифмирования будет представлять собой прямую линию, наклон которой

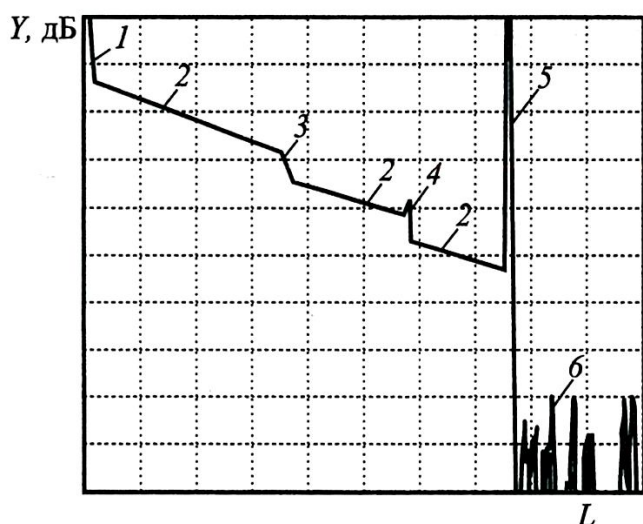


Рис. 4.20. Сигнал обратного рассеяния

определяет коэффициент затухания. Наряду с линейным изменением уровня СОР на рефлектограмме имеются особенности, обусловленные различными неоднородностями. Начальный выброс сигнала (1) вызван френелевским отражением от входного торца исследуемого ОВ. Как правило, он вводит ФПУ в состояние насыщения, а время выхода из него определяет такой важный параметр

ОР, как мертвая зона, т.е. расстояние Δl_m , на котором невозможно обнаружить неоднородности и измерить коэффициент затухания. Выброс сигнала с перепадом затухания (4) возникает при наличии в тракте разъемного соединителя, а также из-за присутствия в волокне незначительных инородных примесей или пузырьков воздуха. Такие отражения характеризуются возвратными потерями, которые могут быть рассчитаны по формуле

$$a_{\text{в}} = -10 \lg R, \quad (4.22)$$

где R — коэффициент отражения.

Неразъемные соединения (сварные, клеевые и механические сростки волокон), в которых обычно отсутствуют отражения, отображаются на рефлектограмме ступенькой (3). Конец ВТ или его обрыв определяется по отраженному от заднего торца импульсу (5) и следующему за ним участку (6) с резкими случайными перепадами уровня регистрируемого сигнала, обусловленными шумами ФПУ.

Использование метода обратного рассеяния предоставляет весьма ценные для практики возможности:

- определять по одной рефлектограмме одновременно целый ряд основных параметров ВТ;
- проводить измерения при одностороннем доступе к ВТ;
- измерять не только общее затухание, но и выявлять распределение потерь вдоль ВТ;
- определять дефектные участки, характеризующиеся скачкооб-

разным изменением сигнала обратного рассеяния;

- диагностировать текущее состояние ВТ и прогнозировать аварийные ситуации путем сравнения оперативно получаемых рефлектограмм ВТ с паспортной.

4.7. Измерение расстояния неоднородности в ОВ

Расстояние L определяется по рефлектограмме, на которой с помощью одного или чаще двух курсоров отмечаются характерные точки, между которыми необходимо найти расстояние по выражению

$$L = \frac{ct}{n_1}, \quad (4.23)$$

где t — интервал времени между зондирующим и отраженным от неоднородности импульсом;

c — скорость света в вакууме;

n_1 — эквивалентный показатель преломления оптического кабеля.

Таким образом, для определения расстояния L необходимо точно измерить интервал времени t и задать эквивалентный показатель преломления n_1 оптического кабеля. Современная электроника позволяет достаточно точно измерять временные интервалы. Однако при задании возникают значительные трудности, поскольку этот показатель зависит не только от параметров ОВ, но и от скрутки ОВ в оптическом кабеле. Дополнительные трудности вызывает определение расстояния по реальной трассе ОК из-за наличия горизонтальных и вертикальных изгибов подземного кабеля в траншее, провисания подвесного ОК, а также технологических его запасов в каждой муфте.

4.8. Измерение затухания и потерь оптической мощности в неоднородностях ОВ

4.8.1. Измерение коэффициента затухания однородного участка ВТ

Измерение затухания с помощью ОР основано на том факте, что каждая точка однородного участка ОВ дает один и тот же уровень СОР. Уменьшение этого уровня с увеличением расстояния, наблюдаемое на рефлектограмме, вызвано общим затуханием, а не только рассеянием света.

Затухание сигнала a между двумя точками — 1 и 2 (рис. 4.21) определяется по формуле

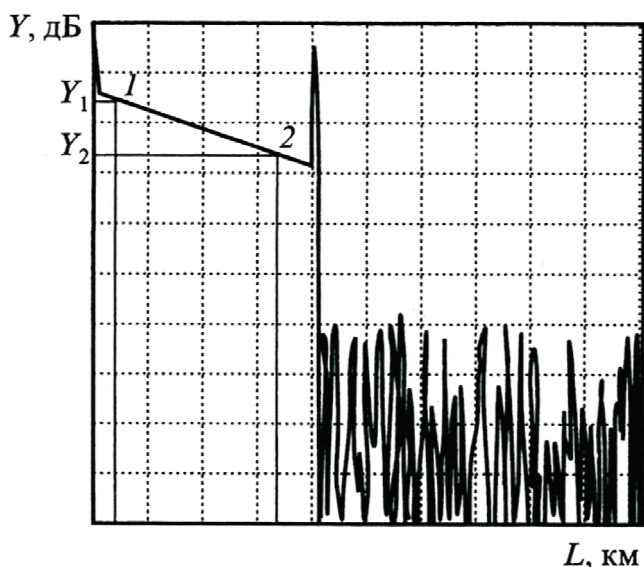


Рис. 4.21. Измерение затухания между двумя точками однородного участка ОВ

$$a = Y_1 - Y_2, \quad (4.24)$$

где Y_1 и Y_2 — уровни СОР (дБ) в точках 1 и 2 соответственно.

Средний коэффициент затухания между точками 1 и 2 ОВ можно рассчитать по формуле

$$\alpha = \frac{Y_1 - Y_2}{L_2 - L_1}, \quad (4.25)$$

где L_1 и L_2 — расстояние между точками 1 и 2 соответственно.

Выбор точек, между которыми определяется затухание,

осуществляется с помощью двух курсоров, перемещаемых оператором по экрану дисплея. В современных ОР расстояние между курсорами, разность уровней и средний коэффициент затухания между этими точками СОР постоянно отображаются на дисплее. Если точки 1 и 2 лежат на однородном участке ОВ, то средний коэффициент затухания (4.27) рассматривается как затухание ОВ на этом участке.

При измерении затухания между двумя точками неоднородного ВТ возникает методическая погрешность, которая обусловлена тем, что абсолютный уровень СОР зависит от таких параметров ОВ, как коэффициент рассеяния, числовая апертура, диаметр модового поля и т.п. Например, если такие точки принадлежат разным ОВ с отличающимися параметрами, то при измерении затухания возникает методическая погрешность, которую можно исключить, проведя измерения с двух концов ВТ и усреднив результат измерения.

4.8.2. Измерение потерь в разъемном и неразъемном соединениях

В разъемных и неразъемных соединениях ОВ в общем случае возникают вносимые и возвратные потери. *Вносимые потери* определяются отношением мощностей падающего на соединение оптического излучения к прошедшему через него. *Возвратные потери* определяются отношением падающей на соединение оптической мощности к

отраженной от него и могут быть выражены через коэффициент отражения (4.24). Наличие возвратных потерь характерно для разъемных соединений, когда между торцами соединяемых ОВ образуется воздушный зазор. Сварные соединения, как правило, не создают отраженного излучения. При определении вносимого затухания так же как и при измерении затухания между двумя точками, возникает методическая погрешность, если параметры соединяемых ОВ отличаются. Если отличия значительны, то могут наблюдаться так называемые отрицательные потери (рис. 4.22, *а*). При этом измерения с другой стороны ВТ дадут в рассматриваемом стыке положительные потери (рис. 4.22, *б*).

Для правильного определения потерь в соединениях (вносимого стыками затухания) измерения следует проводить с обоих концов ВТ. По рефлектограмме, полученной с одного конца ВТ, потери можно определить методом пяти курсоров или методом наименьших квадратов. Типичная рефлектограмма для неразъемного соединения ОВ показана на рис. 4.23.

Для курсоров 1, 2, 4 и 5 фиксируют соответствующие уровни сигналов Y_1, Y_2, Y_4, Y_5 и расстояния l_1, l_2, l_4, l_5 , а для курсора 3 — только расстояние l_3 . За потери в неразъемном соединении принимается разность уровней Y_A и Y_B . Точки *A* и *B* находятся на пересечении прямых, аппроксимирующих сигнал обратного рассеяния на участках до и после соединения с курсором 3. Аппроксимация производится по двум точкам, опре-

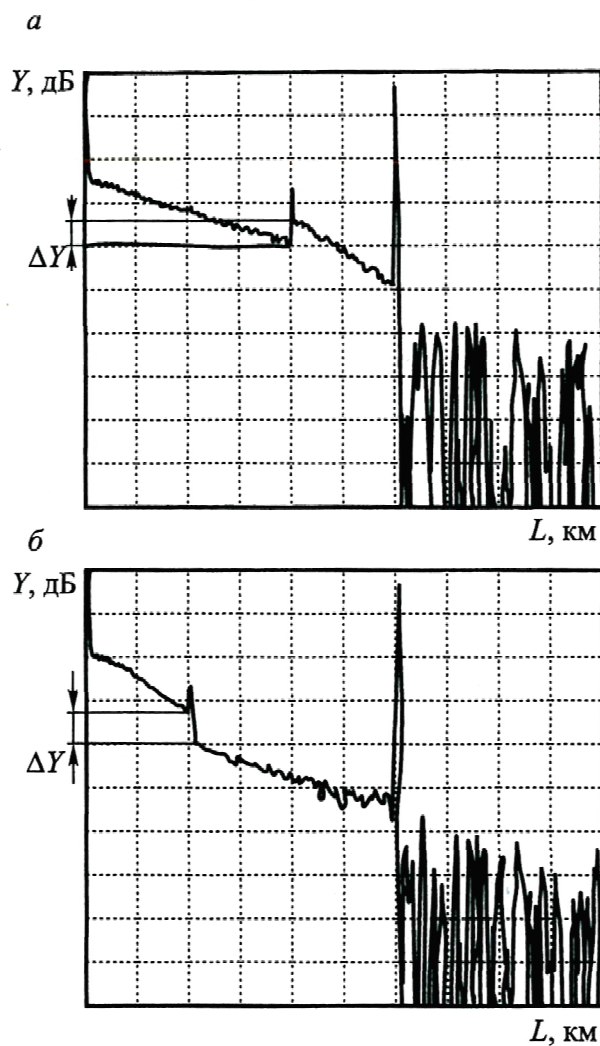


Рис. 4.22. Рефлектограммы, зарегистрированные с обоих концов ОВ
а — рефлектометр включен в начале ОВ; *б* — рефлектометр включен в конце ОВ

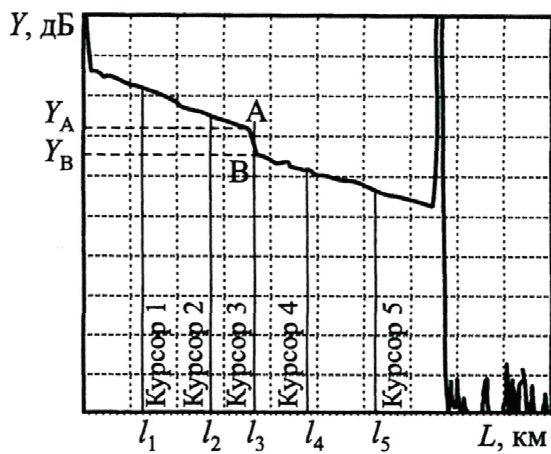


Рис. 4.23. Измерение вносимых потерь в соединении методом пяти курсоров

$$a = \frac{1}{\Delta l} [l_3(Y_2 - Y_1 + Y_4 - Y_5) + Y_1 l_2 - Y_2 l_1 - Y_4 l_5 + Y_5 l_4], \quad (4.26)$$

где $\Delta l = l_2 - l_1 = l_5 - l_4$.

При определении потерь в соединениях для аппроксимации зависимости сигнала обратного рассеяния на участках ВТ до и после стыка ОВ может применяться метод наименьших квадратов. В этом случае в ОР используются либо один курсор, совмещаемый с местом стыка, либо два курсора, которые устанавливаются по разные стороны от стыка на равном расстоянии от него. Данный метод дает более точные результаты при значительном уровне шума.

Действительные потери в соединении могут быть рассчитаны как среднее значение двух измеренных с разных концов значений потерь с учетом знака. Особенностью рефлектограммы разъемного соединения является наличие в месте соединения френелевского отражения, которое при измерении вносимого им затухания игнорируется.

4.8.3. Измерение возвратных потерь

В предыдущем разделе была рассмотрена методика определения вносимых потерь в стыке. В разъемных и некачественных неразъемных соединениях, а также на локальных дефектах и на конце ОВ возникают френелевские отражения. Отраженные от стыков оптические импульсы могут оказывать отрицательное воздействие на источники излучения ВОСП, особенно одномодовые. Поэтому допустимый уровень этих отражений, так называемые возвратные потери, нормируется и должен обязательно измеряться в одномодовых ВТ. Возвратные потери могут быть рассчитаны по формуле (4.24).

Чем больше возвратные потери, тем выше качество разъемного соединения. Для отражения от идеального торца ОВ, отполированного перпендикулярно его оси, возвратные потери составляют 14 дБ, а для оптического соединителя с воздушным зазором минимальные возвратные потери составляют 11 дБ. Такие уровни возвратных потерь недопустимы для большинства систем оптической связи. Для оптических систем связи SDH в соответствии с рекомендациями G.957 минимально допустимые возвратные потери составляют 27 дБ. Таким требованиям удовлетворяют оптические разъемы со сферической полировкой торцов, соединяемых ОВ с наконечниками типа РС (физический контакт). Для увеличения возвратных потерь в разъемных соединениях были разработаны технологии еще более совершенной полировки торцов соединяемых ОВ: SPC (суперфизический контакт) с $a_v > 40$ дБ, UPC (ультрафизический контакт) с $a_v > 50$ дБ и APC (угловой оптический контакт) с $a_v > 60$ дБ.

Для определения возвратных потерь с помощью ОР необходимо получить рефлектограмму (рис. 4.24), на которой виден выброс сигнала, обусловленный френелевским отражением в разъемном соединении. Этот выброс не должен вызывать перегрузку ФПУ. По рефлектограмме измеряют уровни СОР a_S и a_F .

Для расчета возвратных потерь по рефлектограмме используют выражение

$$a_v = -2Y_{S0} - 10 \lg \frac{t_i}{t_{i0}} - 10 \lg \left(10^{\frac{Y_F - Y_S}{5}} - 1 \right), \quad (4.27)$$

где Y_{S0} — относительный уровень СОР при длительности зондирующего импульса t_{i0} ;

t_i — длительность зондирующего импульса, при которой была получена рефлектограмма.

Для $t_{i0} = 1$ не типичные значения затухания обратного рассеяния Y_{S0} для стандартных ОВ

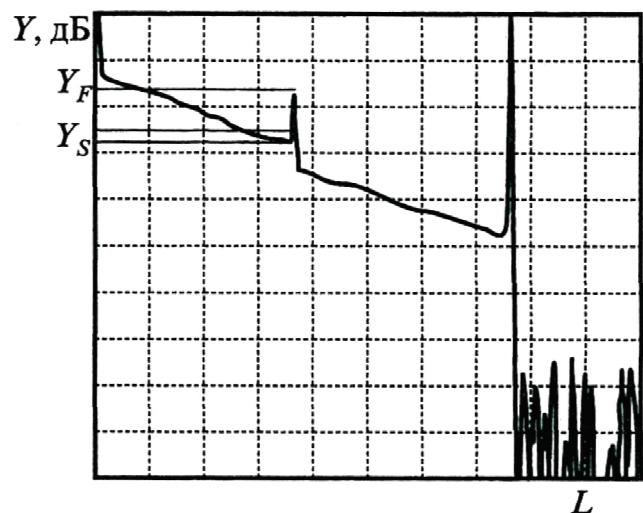


Рис. 4.24. Методика измерения возвратных потерь

приведены в табл. 12. Более точные значения для ОВ конкретного производителя должны определяться экспериментально.

4.8.4. Параметры современных оптических рефлектометров

В настоящее время существует большой выбор ОР. Все современные ОР имеют устройства для накопления СОР от отдельных точек ВТ, логарифмирования СОР, оперативное запоминающее устройство для хранения результатов измерения СОР в каждой точке. В состав ОР входит графический дисплей, позволяющий по полученной рефлектограмме с помощью одного или нескольких курсоров и встроенных функций определять различные параметры ВТ. Большинство ОР имеют возможность обмениваться данными с компьютером через стандартный интерфейс.

Наиболее важными параметрами ОР являются динамический диапазон, время измерения, пространственное разрешение и ширина мертвой зоны.

4.8.5. Динамический диапазон

Динамический диапазон определяет максимальное затухание ВТ, при котором отношение СОР к шуму ≥ 1 . Он зависит от типа исследуемого ОВ и используемой длины волны. Динамический диапазон возрастает с увеличением мощности и длительности зондирующего сигнала, числа накопленных СОР и времени измерения, а также с уменьшением уровня шума ФПУ. Обычно приводимый в рекламных проспектах динамический диапазон ОР соответствует максимальным мощности, длительности зондирующего импульса, числу накоплений СОР и времени измерения. Динамический диапазон можно определить для конкретной рефлектограммы как разность между максимальным СОР в ближней зоне и уровнем шума за пределами ВТ.

Уровень шума (порог реагирования) определяется параметрами ФПУ и может быть выражен в единицах оптической мощности $P_{\text{пор}}$ или в логарифмических единицах $Y_{\text{пор}}$ по отношению к некоторой мощности $P_{\text{н}}$, принимаемой за нулевую (0 дБ)

$$Y_{\text{пор}} = 5 \lg(P_{\text{пор}} / P_{\text{н}}). \quad (4.28)$$

Порог реагирования ФПУ зависит от типа фотоприемника, коэффициента шума предварительного усилителя и полосы пропускания Δf усилителя

ФПУ. Пороговая мощность может быть выражена через спектральную плотность шума $S_{ш}$, приведенную ко входу ФПУ

$$P_{пор} = S_{ш} \Delta f. \quad (4.29)$$

Полоса пропускания Δf усилителя ФПУ выбирается, исходя из допустимых искажений, отраженных от неоднородностей ВТ оптических импульсов на выходе ФПУ. Причем между длительностью импульса $t_{и}$ и требуемой полосой пропускания Δf существует обратно пропорциональная зависимость. Полагая известной величину порога реагирования $P_{пор0}$ ФПУ для длительности импульса, при которой нормируется относительный уровень СОР в ближней зоне ВТ, т.е. при $t_{и} = 1$ не, можно записать порог реагирования ФПУ для любой длительности импульса

$$P_{пор} = P_{пор0} (t_{и0} / t_{и})^{0,5}, \quad (4.30)$$

Для увеличения отношения сигнала к шуму, следовательно, и для увеличения динамического диапазона используют накопление СОР на выходе ФПУ. Накопление или усреднение сигнала в каждой точке рефлектограммы эквивалентно многократным измерениям с последующим расчетом среднего значения. Отношение сигнала к шуму возрастает при этом в корень из \sqrt{N} раз, где N — число накоплений (измерений) СОР в одной точке.

С учетом сказанного для порога реагирования можно записать

$$Y_{пор} = 5 \lg(P_{пор0} / P_{н}) + 2,5 \lg(t_{и0} / t_{и}) - 2,5 \lg(N). \quad (4.31)$$

Исходя из определения динамического диапазона с учетом (4.20) и (4.31), получим для него

$$D = 5 \lg(P_0 / P_{пор0}) + Y_{S0} + 7,5 \lg(t_{и} / t_{и0}) + 2,5 \lg(N) - a_{оп}. \quad (4.32)$$

Динамический диапазон может быть определен экспериментально по зарегистрированной рефлектограмме, как показано на рис. 4.25. Определить по рефлектограмме максимальный уровень обратного рассеяния Y_{Sm} достаточно просто. Сложнее обстоит дело с уровнем, соответствующим среднеквадратическому уровню шума $Y_{ш}$ (шум — процесс случайный). В то же время максимальный уровень шума Y_{im} за

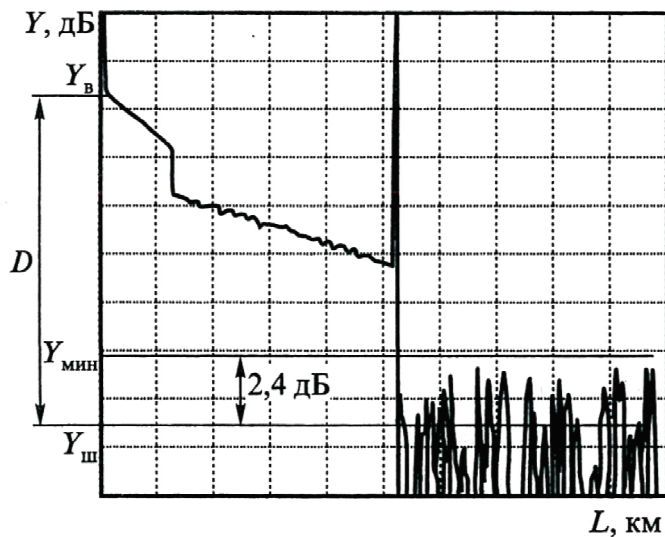


Рис. 4.25. Экспериментальное определение динамического диапазона

пределами ВТ определить достаточно легко.

Для оценки динамического диапазона можно использовать следующее допущение.

Полагаем, что максимальный уровень шума $P_{шм}$ в линейном масштабе примерно в 3 раза превышает среднеквадратическое значение уровня шума $P_{ш}$. Тогда после логарифмирования среднеквадратический уровень шума $Y_{ш}$ будет меньше максимального на 2,4 дБ.

4.8.6. Время измерения

Регистрация рефлектограмм происходит не в реальном масштабе времени, так как для выделения сигнала из шума необходимо накопление СОР. Время измерения зависит от числа накоплений N и периода следования зондирующих импульсов T_0 . Последняя величина зависит от максимальной длины ВТ L_m , которая, так же как и N , устанавливается тем или иным способом оператором. Время измерения можно определить по формуле

$$T_{и} = NT_0 = NL_m n_1 / c, \quad (4.33)$$

где n_1 — коэффициент преломления сердечника ОВ;

c — скорость света в вакууме.

Отметим, что таким образом полученное время будет определяться при *параллельном накоплении* СОР во всех точках рефлектограммы. Это наиболее эффективное (быстрое) накопление. Однако оно требует использования быстродействующей, следовательно, неэкономичной элементной базы для накопителя. Это затрудняет использование

параллельного накопления для малогабаритных полевых ОР. Рефлектометры предыдущих поколений использовали последовательное накопление, когда за один период зондирования измеряется СОР только в одной точке рефлектограммы. В этом случае время измерения возрастало в M раз, где M — число точек на рефлектограмме. Для сокращения времени измерения число точек необходимо уменьшать. С другой стороны, оно должно быть достаточным для обнаружения отражающих неоднородностей. Разумное число точек составляет

$$M = 2L_m / \Delta l = 2T_0 / t_{\text{н}}. \quad (4.34)$$

Кроме параллельного и последовательного накоплений, находит применение и параллельно-последовательное накопление. Время измерения при этом имеет промежуточное значение между двумя крайними случаями.

4.8.7. Пространственное разрешение

Пространственное разрешение определяется минимальным расстоянием между двумя локальными неоднородностями, которые можно видеть на рефлектограмме раздельно. Оно в первую очередь зависит от длительности зондирующего импульса и может быть оценено по формуле (4.19).

К ухудшению пространственного разрешения приводят:

- недостаточная полоса пропускания ФПУ (искажение отраженных от неоднородностей сигналов);
- насыщение ФПУ отраженными от неоднородностей сигналами;
- значительная величина дисперсии;
- наличие неоднородностей, различающихся коэффициентами отражения (имеющая больший — маскирует ту, у которой он меньше).

Для улучшения пространственного разрешения в ближней зоне ВТ необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса, не допускать насыщения ФПУ, уменьшая мощность зондирующего импульса или коэффициент передачи ФПУ.

4.8.8. Нерабочая область (мертвая зона) ОР

Мертвая зона возникает на рефлектограмме участка, следующего за крупной отражающей неоднородностью, которая вводит ФПУ

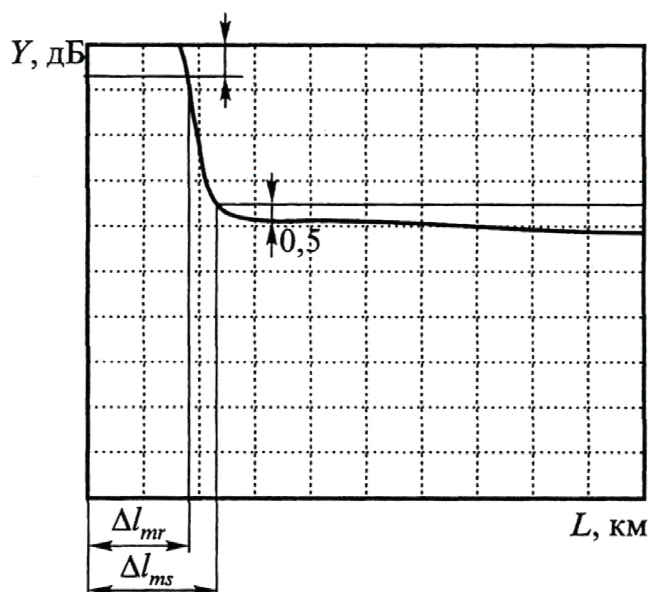


Рис. 4.26. Мертвая зона

в состояние насыщения. Обычно самое большое отражение, приводящее к этому, возникает при отражении от входного торца ВТ. Отраженный импульс сильно уширяется и, пока ФПУ не выйдет из состояния насыщения, другие неоднородности нельзя обнаружить. Ширина этого импульса Δl_m определяет ширину мертвой зоны ОР. Различают мертвую зону по обратному рассеянию Δl_{ms} и по отражению Δl_{mr} , как показано на рис. 4.26.

Мертвая зона по отражению определяется расстоянием между началом отраженного импульса и точкой с уровнем -1,5 дБ по отношению к насыщению. *Мертвая зона по рассеянию* определяется расстоянием между началом отраженного импульса и точкой с уровнем, который отличается от уровня сигнала обратного рассеяния на $\pm 0,5$ дБ. Для уменьшения мертвой зоны в ближней зоне ВТ в выходной разъем ОР вводят иммерсионную жидкость, уменьшают длительность и мощность зондирующего импульса, включают между ОР и исследуемым ВТ дополнительную бухту ОВ.

4.8.9. Оптимальный выбор параметров ОР

Одной из основных целей рефлектометрических измерений является измерение коэффициентов затухания на различных участках ВТ (на различных строительных длинах), а также вносимых и возвратных потерь в разъемных и неразъемных соединениях. При этом очень важно иметь малую погрешность определения относительных уровней СОР на больших расстояниях от ОР. Это требует большого динамического диапазона, для чего необходимо увеличивать длительность зондирующего импульса, приводящего в свою очередь к ухудшению пространственного разрешения.

Другой основной целью таких измерений является измерение расстояний до различных неоднородностей, в качестве которых можно

рассматривать концы ВТ, места обрывов, разъемные и неразъемные соединения, локальные дефекты. Для увеличения их точности необходимо уменьшать длительность зондирующего импульса.

Повышению точности измерений и успешному достижению обеих целей способствует увеличение числа накоплений СОР и времени измерения.

Выбор длительности зондирующего импульса должен производиться с учетом конкретной задачи. Для получения более полной информации о ВТ желательно регистрировать рефлектограммы с двух сторон ВТ и при разных длительностях зондирующих импульсов. Время измерения и число накоплений СОР желательно увеличивать для уменьшения погрешностей измерений.

Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ, ЗАТУХАНИЯ И ВНОСИМЫХ ПОТЕРЬ

5.1. Измеритель средней мощности оптического излучения «Алмаз-21»

5.1.1. Назначение и технические характеристики прибора

Прибор предназначен для измерения средней мощности непрерывного и импульсно-модулированного оптического излучения, а также относительных уровней мощности при измерении затухания волоконно-оптического кабеля в диапазонах длины волны 800—900, 1200—1400 и 1400—1600 нм.

Рабочие условия эксплуатации прибора:

- температура окружающего воздуха — от -10 до +40 °С;
- относительная влажность воздуха — 90 % при +30 °С (303 К);
- атмосферное давление — 70—106,7 кПа (537—800 мм рт. ст.).

Прибор применяется в оптической связи и световодных системах передачи информации. Технические характеристики измерителя оптической мощности «Алмаз-21» представлены в табл. 13.

Таблица 13

Технические характеристики прибора «Алмаз-21»

Характеристика	Значение характеристики
Тип детектора	Inp/GalnAsP, диаметр площадки — 1,0 мм
Рабочий спектральный диапазон, нм	800 — 900, 1200 — 1400, 1400 — 1600
Значения длины волны калибровки, нм	(850 + 10), (1310 + 25), (1550 + 25)
Диапазон измерений оптической мощности	10^{-9} — $2 \cdot 10^{-3}$ Вт; от -60,0 до +3,0 дБм
Основная погрешность на длине волны калибровки	Не более $\pm 10\%$ ($\pm 0,5$ дБ)
Погрешность измерения относительных уровней мощности	$\pm 5\%$ (+0,2 дБ)

Характеристика	Значение характеристики
Основная погрешность в рабочих спектральных диапазонах	Не более $\pm 12\%$ ($\pm 0,6$ дБ)
Разрешение цифровой индикации: в логарифмической шкале, в линейной шкале	0,01 дБ 1 %
Количество ячеек памяти результатов измерения	9
Интерфейс связи с ЭВМ	RS-232 C
Тип оптического соединителя	FC*
Питание автономное	NiCd — аккумуляторные батареи размера AA (1,2 В; 0,75 А·ч), 3 шт.
Питание от сети 220 В, 50 Гц	Через внешний блок питания
Время непрерывной работы от одного комплекта аккумуляторных батарей	Не менее 10 ч
Габариты, мм	200×100×40
Масса, кг	0,28

*Примечание. По желанию потребителя прибор может быть укомплектован входными адаптерами типа ST и SC.

5.1.2. Устройство и принцип работы прибора

Принцип действия измерителя основан на преобразовании оптического излучения в электрический ток. Структурная схема прибора представлена на рис. 5.1. Оптический сигнал через стандартный разъем подается на фотодиод (ФД). Ток, возникающий в цепи ФД, поступает на вход усилителя постоянного тока (УПТ). Напряжение с выхода УПТ преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой код. Микроконтроллер считывает и обрабатывает код с выхода



Рис. 5.1. Структурная схема измерителя «Алмаз-21»

АЦП, управляет выбором коэффициента усиления УПТ в зависимости от уровня входного сигнала, принимает и обрабатывает сигналы, поступающие с клавиатуры, управляет выводом результата измерения и служебной информации на жидкокристаллический дисплей (ЖК-дисплей), контролирует энергоресурс аккумуляторных батарей.

Управление прибором осуществляется семью кнопками, расположенными на лицевой панели. Функциональное назначение кнопок описано в табл. 14. Нажатие кнопок сопровождается коротким звуковым сигналом. Для обеспечения уверенного срабатывания длительность нажатия кнопки должна быть не менее 0,5 с.

Таблица 14

Функциональное назначение кнопок прибора

Обозначение кнопки	Функциональное назначение кнопки
	Включение/выключение питания прибора
	Переключение шкалы представления результата измерения, переключение прибора в режим измерения из режимов просмотра памяти и записи в память
	Переключение рабочего спектрального диапазона
	Установка нулевых показаний прибора при закрытом оптическом входе
	«Установка уровня отсчета», запись текущего показания прибора в качестве уровня отсчета для относительной логарифмической шкалы
	Запись текущего показания прибора в память
	Последовательный просмотр содержимого ячеек памяти в режиме чтения и перебор номеров ячеек памяти в режиме записи

Результат измерения и служебная информация отображаются на матричном ЖК-дисплее, расположенном в верхней части лицевой панели прибора.

На верхней торцевой панели прибора расположен стандартный оптический разъем (оптический вход прибора).

На правой боковой стенке корпуса прибора находятся разъемы для подключения внешнего источника питания и интерфейса дистанционного управления прибором.

В приборе имеется 9 ячеек энергонезависимой памяти с номерами 0—8. В ячейке памяти с номером «0» фиксируется уровень, относительно которого производится расчет затухания, а остальные служат для запоминания результатов измерения. Записанные в память результаты измерения хранятся в течение всего срока службы исправного прибора. Замена элементов автономного питания не приводит к потере информации в ячейках памяти. Хранящиеся в памяти прибора значения могут быть выведены на дисплей в режиме просмотра содержимого памяти или прочитаны в ЭВМ в режиме дистанционного управления прибором.

В специальной области памяти прибора хранится его текущая конфигурация. При очередном включении прибор устанавливает тип шкалы и длину волны, выбранные в предыдущем сеансе работы.

Условно выделяют четыре режима работы прибора:

- измерения (основной режим работы прибора);
- запись измеренных значений в память;
- просмотр значений, хранящихся в памяти;
- дистанционное управление.

Режим измерения. Режим измерения устанавливается сразу после включения прибора. Пример информации, отображаемой на дисплее прибора в режиме измерения, представлен на рис. 5.2. В верхней строке выводится результат измерения, в правой части нижней строки — среднее значение длины волны установленного рабочего спектрального диапазона.

В этом режиме предусмотрена возможность представления результата измерения в одной из трех шкал, выбираемой пользователем при помощи клавиатуры (кнопка «WdBm/dB»).

В линейной абсолютной шкале результат измерения средней оптической

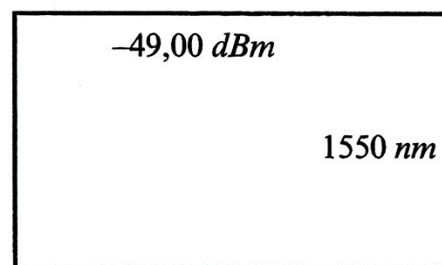


Рис. 5.2. Вид дисплея в режиме измерения

мощности представляется в Вт. В зависимости от уровня сигнала на входе он отображается в одном из шести форматов, соответствующих шести поддиапазонам:

#, # # # mW

#, # # # μ W

#, # # #, # μ W

#, # # #, # nW

#, #, # # μ W

#, #, # # nW

В логарифмической абсолютной шкале результат измерения средней оптической мощности представляется в дБ относительно уровня 1 мВт и на дисплей выводится в формате «# #, # # dBm».

В логарифмической относительной шкале результат измерения средней оптической мощности представляется в децибелах относительно уровня средней мощности, измеренного ранее и хранящегося в памяти прибора. На дисплей результат измерения выводится в формате «# #, # # dB» (используется при измерении коэффициента передачи волоконно-оптических трактов).

Прибор предназначен для измерения средней мощности оптического излучения в трех спектральных диапазонах (см. табл. 13). Выбор рабочего диапазона осуществляется при помощи клавиатуры (кнопкой « λ »). На дисплее при этом отображается среднее значение длины волны выбранного диапазона (850, 1310 или 1550 нм).

Для обеспечения измерения с минимальной погрешностью предусмотрена возможность автоматической установки нулевых показаний при закрытом оптическом входе после нажатия кнопки «>0<». Длительность процесса установки нуля составляет приблизительно 10 с. В процессе установки контролируется превышение допустимого порога смещения нуля УПТ. Если обнаруживается превышение порога, то на дисплее появляется предупреждение о необходимости установки заглушки на оптическом входе прибора.

Для обеспечения возможности измерения коэффициента передачи оптических трактов (затухания) предусмотрена операция установки уровня отсчета для относительной логарифмической шкалы прибора. В ходе данной операции в память прибора (ячейка «0») заносится значение, которое будет использоваться в качестве уровня отсчета.

Вычисление коэффициента передачи, дБм, производится по формуле

$$K = P - P_0, \quad (5.1)$$

где P — значение средней мощности в дБм, измеренное на выходе оптического тракта;

P_0 — уровень отсчета в дБм, хранящийся в памяти прибора.

Коэффициент K соответствует коэффициенту передачи оптического тракта, если P_0 — средняя мощность, измеренная на входе тракта.

Режим записи измеренных значений в память прибора. Режим записи в память текущего показания прибора устанавливается нажатием кнопки «Запись». В этом режиме прибор продолжает отслеживать и выводить на дисплей информацию о средней мощности входного оптического сигнала. Последовательным нажатием кнопки «Просмотр» выбирают номер ячейки памяти. Повторное нажатие кнопки «Запись» приводит к запоминанию текущего результата измерения мощности в ячейке с выбранным номером и возврату в режим измерения. Нажатие кнопки «WdBm/dB» переводит прибор в режим измерения без записи текущего показания в память. Нажатие других кнопок в этом режиме игнорируется. Результаты заносятся в ячейки в единицах измерения, установленных на момент записи.

Режим просмотра значений, хранящихся в памяти прибора, устанавливается нажатием кнопки «Просмотр». В этом режиме на дисплей прибора последовательно выводятся значения, записанные в его ячейках 0—8 памяти. Переход к очередной ячейке производится нажатием кнопки «Просмотр». Изменение номеров ячеек происходит циклически (0, 1, 2, ..., 7, 8, 1, 2, и т.д.). Содержимое нулевой ячейки выводится только после первого нажатия этой кнопки.

Нажатие кнопки «Установка уровня отсчета» в этом режиме приводит к записи значения текущей ячейки в нулевую в качестве уровня отсчета для получения относительной логарифмической шкалы. После этого прибор переходит в режим измерения коэффициента передачи (затухания) с новым значением уровня отсчета. Необходимо отметить, что содержимое ячейки, выраженное в дБ, не может быть использовано в качестве уровня отсчета, так как не содержит информации об абсолютном уровне мощности оптического сигнала.

Выход из режима просмотра ячеек памяти производится нажатием кнопки «W/dBm/dB». Другие кнопки в этом режиме игнорируются.

Режим дистанционного управления. В приборе «Алмаз-21» предусмотрен интерфейс RS-232 для связи с ЭВМ. Он обеспечивает про-

ведение настройки прибора в процессе изготовления и ремонта, периодические поверки его метрологических характеристик, а также автоматизированные измерения под управлением ЭВМ и считывание ею полученных результатов, хранящихся в памяти прибора, соответствующим образом укомплектованного.

Управление подсветкой ЖК-дисплея. Порядок включения подсветки следующий: нажимают кнопку «Установка уровня отсчета» и, удерживая ее, нажимают кнопку, включающую питание. Убрать подсветку дисплея можно только выключив питание прибора. Следует помнить, что потребляемая прибором мощность при включенной подсветке возрастает почти в два раза.

5.1.3. Порядок проведения работы

Подготовка прибора к проведению измерений. Перед проведением измерений необходимо обеспечить чистоту рабочих поверхностей оптических соединителей измерителя и источника сигнала, протерев их батиновой салфеткой (ГОСТ 84574-80), смоченной этиловым спиртом (ГОСТ 18300-72). Рекомендуемая норма расхода этилового спирта составляет $0,135 \cdot 10^{-4}$ л на одну протирку оптического соединителя.

Прибор включается нажатием кнопки «Вкл/Выкл» на дисплее, после короткого звукового сигнала в течение 2 с отображаются наименование, серийный номер и год его изготовления (рис. 5.3). Затем прибор переходит в режим измерения, а на дисплее появляется изображение, аналогичное приведенному на рис. 5.2.

Измерения в диапазоне до -60 дБм с минимальной погрешностью обеспечиваются установкой нуля после пятиминутного прогрева прибора с момента включения.

Эту процедуру рекомендуется выполнять перед каждым циклом измерений. Если показания прибора при закрытом оптическом входе при линейной шкале измерения превышают «00,10 *nW*» или равны «00,00 *nW*», ее обязательно проводят.

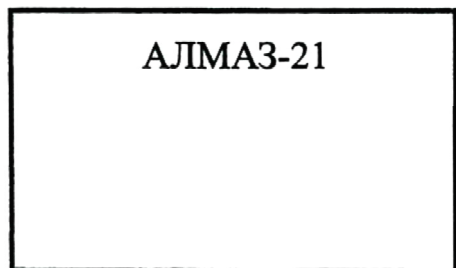


Рис. 5.3. Вид дисплея в момент включения прибора

Для установки нуля прибора требуется выполнить следующие действия:

- плотно закрыть заглушкой (ИУПЯ. 725316.001) оптический вход прибора;
- дождаться установления показаний на индикаторе прибора (тип шкалы не имеет значения);

- нажать и отпустить кнопку «>0<», при этом в нижней строке дисплея появится сообщение «Установка нуля» (рис. 5.4), которое сохраняется в течение всего процесса установки нуля.

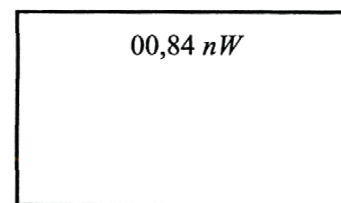


Рис. 5.4. Вид дисплея в режиме установки нуля

По окончании установки нуля на дисплее должны появиться результаты измерения в пределах от «00,00 nW » до «00,10 nW ». Если после нажатия кнопки «>0<» на дисплее появляется сообщение «Проверьте наличие заглушки!» то проверяют правильность установки заглушки на оптическом входе прибора. Если все выполнено должным образом, то такое сообщение свидетельствует о неисправности и необходимости настройки прибора или его ремонта на предприятии-изготовителе.

Выбор типа измерения осуществляется последовательным нажатием кнопки «W/dBm/dB». Контролируют правильность выбора шкалы по отображению соответствующих единиц измерения справа от его результата.

Установку рабочего спектрального диапазона входного оптического сигнала производят последовательным нажатием кнопки « λ ». Среднее значение длины волны установленного диапазона (850, 1310 или 1550 нм) отображается в правой нижней части дисплея (см. рис. 5.2).

Проведение измерений.

1. Измерение средней мощности оптического излучения.

Исследуемый сигнал подается на оптический вход прибора. Результат измерения появляется в верхней строке дисплея (см. рис. 5.3). Показания прибора обновляются примерно два раза в секунду. Время установления показаний после значительного изменения входного уровня мощности не превышает 10 с.

2. Измерение затухания оптического тракта.

Для измерения затухания оптического тракта рекомендуется выполнить следующие действия:

- измерить среднюю мощность сигнала на входе исследуемого тракта, подключив выход источника сигнала к оптическому входу прибора;
- не отключая источника сигнала, нажать кнопку «Установка уровня отсчета» и дождаться появления показаний «00.00 dB»;
- подключить источник сигнала к входу исследуемого тракта, а сигнал с выхода тракта подать на вход прибора;

- прочесть на дисплее прибора значение затухания, вносимого исследуемым трактом.

3. Установка уровня отсчета.

Процедура установки уровня отсчета используется при измерении затухания волоконно-оптических трактов для фиксации значения уровня мощности на входе испытуемого тракта и выполняется двумя способами.

При первом способе подключают к входу прибора источник оптического сигнала, уровень которого в дальнейшем должен служить точкой отсчета. Получив устойчивый результат измерения на дисплее, нажимают кнопку «Установка уровня отсчета». При этом прибор автоматически запоминает текущее показание в ячейке с номером 0. Затем прибор переходит в режим вывода значения в единицах относительной логарифмической шкалы («dB»), используя новое значение уровня отсчета для преобразования результата измерения. Новое показание прибора должно быть равно «00,00 dB».

Второй способ позволяет установить значение уровня мощности из ячейки памяти прибора. Для этого переходят в режим просмотра памяти, нажав кнопку «Просмотр». Выбирают нужный номер ячейки и нажимают кнопку «Установка уровня отсчета». При этом содержимое выбранной ячейки записывается в ячейку с номером 0. Затем прибор переходит в режим измерения коэффициента передачи, используя новое значение уровня отсчета для преобразования результата в децибелах. Следует иметь в виду, что содержимое ячейки памяти, выраженное в децибелах, не может быть использовано в качестве уровня отсчета, так как в ней отсутствует информация об абсолютном уровне мощности оптического сигнала.

4. Работа с памятью прибора.

Запись текущего показания прибора в ячейку памяти происходит при установке прибора в режим измерения и нажатии кнопки «Запись». В нижней строке дисплея появляются сообщение «Запись» и номер соответствующей ячейки (рис. 5.5).

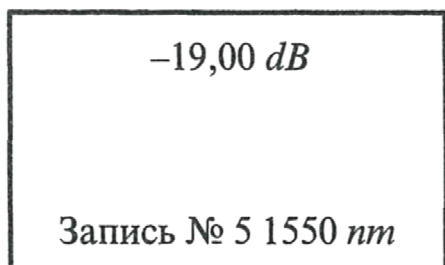


Рис. 5.5. Вид дисплея в режиме записи в память

В этом состоянии прибор ждет подтверждения намеченного действия повторным нажатием кнопки «Запись» либо отказа от него нажатием кнопки «W/dBm/dB». Перед

повторным нажатием кнопки «Запись» пользователь может изменить номер выбранной ячейки, последовательно нажимая кнопку «Просмотр». По окончании записи прибор возвращается в режим измерения. При записи нового значения в ячейку памяти старое значение стирается.

Просмотр содержимого ячеек памяти прибора.

Нажать кнопку «Просмотр» в режиме измерения. При этом в нижней строке дисплея появляется сообщение «Чтение № 0», а в строке, предназначенной для вывода результата измерения, появится содержимое нулевой ячейки — значение уровня отсчета для относительной логарифмической шкалы. Переход к очередной ячейке памяти производится повторным нажатием кнопки «Просмотр». Номер ячейки в нижней строке увеличивается на единицу, а в строке результата появляется ее содержимое. Изменение номера ячейки происходит по циклу (0, 1, 2, ..., 7, 8, 1, 2 и т.д.). Содержимое ячейки с номером «0» выводится только после первого нажатия кнопки «Просмотр». Выход из режима просмотра памяти в режим измерения производится нажатием кнопки «W/dBm/dB».

5.2. Технические характеристики и устройство рефлектометра

5.2.1. Назначение рефлектометра

Технические характеристики, принцип действия, программное обеспечение и поверку рассмотрим на примере рефлектометров ОР-2-1 и ОР-2-2.

Оптический рефлектометр предназначен для измерения в лабораторных и полевых условиях затухания в волоконных световодах и их соединениях, длины ОВ и расстояния до любого их участка. Он соответствует требованиям ГОСТ 22261-82 по метрологическим характеристикам и может использоваться при производстве ОВ и ОК, а также при монтаже и эксплуатации волоконно-оптических линий связи.

Условия эксплуатации рефлектометра (рабочие):

- температура окружающего воздуха — 0—40 °С; относительная влажность воздуха — не более 90 % при 25 °С;
- атмосферное давление — 84—106,7 кПа.

5.2.2. Технические характеристики рефлектометров

Значения длины волны оптического излучения на выходе ОР-2-1 приведены в табл. 15.

Таблица 15

Оптические блоки рефлектометра и допуски на рабочую длину волны

Обозначение сменного оптического блока	Длина волны оптического излучения, мкм
ММ-0,85 (многомодовый)	$0,85 \pm 0,03$
ММ-1,30 (многомодовый)	$1,31 \pm 0,03$
ОМ-1,30 (одномодовый)	$1,31 \pm 0,03$
ОМ-1,55 (одномодовый)	$1,55 \pm 0,03$

Измеряемые расстояния — 2, 5, 10, 20, 40, 90 и 180 км.

Минимальная дискретность отсчета измеряемого расстояния на экране ПЭВМ для длин 2, 5, 10, 20 км составляет 0,4 м; 40, 90 км — 0,6 м; 180 км — 1,0 м.

Предел допустимого значения абсолютной погрешности измеряемого расстояния

$$dL = \pm \left(dl + \frac{Ldn}{n} + 5 \cdot 10^{-5} L \right), \quad (5.2)$$

где $dl = 3$ м (для измеряемых расстояний, равных 2, 5, 10 и 20 км); 6 м (40 и 90 км); 12 м — 180 км;

L — длина ОВ, м;

dn — погрешность, с которой определен показатель преломления для измеряемого ОВ;

n — показатель преломления ОВ.

Величина n может устанавливаться в интервале от 1,0000 до 2,0000 с шагом 0,0005.

Минимальная дискретность отсчета измеряемого затухания на экране ПЭВМ составляет 0,001 дБ.

Значения динамического диапазона для уровня оптической мощности, (дБ), при различных оптических блоках и длительности импульсов приведены в табл. 16.

Абсолютная погрешность при измерении затухания должна быть не более $\pm 0,05$ дБ/дБ.

Рефлектометр допускает возможность установки значений длительности зондирующих импульсов согласно данным, приведенным в табл. 17.

Таблица 16

Динамический диапазон оптических блоков рефлектометра в зависимости от длительности зондирующего импульса

Тип сменного оптического блока	Длительность зондирующего импульса, не (<i>ns</i>)					
	30	90	330	1000	3000	10 000
	Динамический диапазон, дБ					
ММ-0,85 мкм	18	21	24,5	28	-	-
ММ-1,3 мкм	17	20	23,5	27	-	-
ОМ-1,3 мкм	13	16	19	22	25,5	29
ОМ-1,55 мкм	12	15	18	21	24,5	28

Таблица 17

Значения длительности зондирующих импульсов

Обозначение сменного оптического блока	Длительность зондирующих импульсов, не (<i>ns</i>)
ММ-0,85	30, 90, 330, 1000
ММ-1,3	30, 90, 330, 1000
ОМ-1,3; ОМ-1,55	30, 90, 330, 1000, 3000, 10 000

Технические характеристики рефлектометра ОР-2-2 приведены в табл. 18.

Таблица 18

Технические характеристики рефлектометра ОР-2-2

Тип сменного блока	Многомодовый			Одномодовый		
Длина волны, нм	850±20	1300±20	850±20 1300±20	1310±20	1550±20	1310±20 1550±20
Динамический диапазон	30 -	29 -	283 -	365 415	35 395	36/345 41/39
Мертвая зона при измерении затухания*, м	145					
Мертвая зона при обнаружении неоднородностей*, м	35					
Длительность импульсов, не	10—1000			10—20 000		
Диапазоны расстояний, км	2,5,10,20,40,80			2,5,10,20,40,80,120,160,240		
Дискретность отображения затухания, дБ	0,001					
Погрешность измерения расстояний, м	±(0,3 + интервал дискретизации + 5·10 ⁻⁵ ·L)					
Погрешность измерения затухания, дБ/дБ	0,05					
Интервал дискретизации, м	0,5—6			0,5—18		
Диапазон установки показателя преломления	10 000—20 000					

Тип сменного блока	Многомодовый	Одномодовый
Тип оптического разъема	FC, ST, SC, SMA, D4	
Питание	аккумуляторная батарея Pb (Lead Acid)/~ 220 В	
Потребляемая мощность, Вт	6	
Габариты, мм	293×250×60	
Масса, кг	4	

*Примечание. Коэффициент отражения -40 дБ, длительность импульса 10 нс.

Рефлектометры обеспечивают работу с числом усреднений результатов измерений, устанавливаемых пользователем: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256.

Многомодовые ОВ подключаются к рефлектометру через оптический разъем типа «Лист-Х», а одномодовые — через разъем типа FC («Левша»). Возможна установка и других оптических разъемов.

Управление работой рефлектометра, отображение и хранение полученной информации осуществляются с помощью ПЭВМ типа «notebook». ПЭВМ может работать автономно. Кроме того, для работы с ним может использоваться любая ПЭВМ, совместимая с IBM PC, связь с которой осуществляется через последовательный порт RS-232 с помощью соединительного кабеля, поставляемого в комплекте с рефлектометром.

Рефлектометр обеспечивает свои технические характеристики через 10 мин после включения питания и сохраняет их в течение 8 ч непрерывной работы.

Питание рефлектометр может получать:

- от встроенного аккумулятора Panasonic VW-VBF2E (12 В, 2 А·ч);
- источника постоянного тока с напряжением (12 ± 3) В, обеспечивающего ток нагрузки не менее 3 А;
- источника переменного тока с напряжением (220 ± 20) В и частотой $(50,0 \pm 2,5)$ Гц через специальный источник ИП-2-1, входящий в комплект поставки, напряжение на выходе источника которого составляет $(14,3 \pm 0,3)$ В.

Время непрерывной работы от встроенного, полностью заряженного аккумулятора составляет не менее 3 ч, а его зарядка от источника питания ИП-2-1, поставляемого в комплекте с рефлектометром, — 14 ч.

При питании от сети 220 В, 50 Гц через специальный источник ИП-2-1, входящий в комплект с рефлектометром, его электрическая изоляция между цепью питания и корпусом выдерживает без пробоя

и поверхностного перекрытия испытательное напряжение 1500 В при частоте 50 Гц. Электрическое сопротивление изоляции между цепью сети питания и корпусом источника питания ИП-2-1 составляет не менее 20 МОм.

Мощность, потребляемая рефлектометром, не превышает 15 Вт, а вместе с ПЭВМ типа «notebook» — не более 36 Вт. Габариты блоков рефлектометра, мм:

- базовый блок — 260×290×65;
- ПЭВМ типа «notebook» — 300×210×55;
- источник питания — 150×85×45.

Масса блоков рефлектометра, кг:

- базовый блок — 3,5;
- ПЭВМ типа «notebook» — 3,3;
- источник питания — 0,4.

5.2.3. Устройство и принцип работы рефлектометра

Устройство, принцип действия и программное обеспечение рефлектометров ОР-2-1 и ОР-2-2 аналогичны. Рефлектометр состоит из одного базового блока РХЭ.013.001, четырех сменных оптических блоков ММ-0,85; ММ-1,3; ОМ-1,3; ОМ-1,55, ПЭВМ типа «notebook», источника питания ИП-2-1 и соединительных кабелей.

Базовый блок выполнен в прямоугольном пластмассовом корпусе настольно-переносного типа фирмы Vorla.

В его состав входят аккумулятор, импульсный преобразователь напряжения и электронные узлы, предназначенные для управления процессами измерения и накопления информации, а также сменный оптический блок.

На передней панели сменного оптического блока для удобства его извлечения имеется специальный ключ. Данный блок включает в себя оптические приемное и передающее устройства, а также разветвитель. На передней панели сменного оптического блока установлен оптический разъем для подключения измеряемого ОВ.

Источник, питающийся от сети 220 В, ИП-2-1 выполнен в прямоугольном пластмассовом корпусе настольно-переносного типа фирмы Vorla.

Конструкция ПЭВМ типа «notebook» стандартная.

Принцип работы рефлектометра основан на измерении сигнала обратного рэлеевского рассеяния при прохождении по ОВ мощного одиночного оптического импульса. Слабый сигнал обратного рассеяния регистрируется чувствительным оптическим приемником, преобразуется в цифровую форму и многократно усредняется для уменьшения влияния шумов аппаратуры.

Структурная схема рефлектометра приведена на рис. 5.6.

В рефлектометр входят:

- блок управления (БУ), предназначенный для получения сигналов управления устройством формирования лазерного импульса и аналого-цифровым преобразователем;
- формирователь (Ф), служащий для формирования сигнала запуска оптического передающего устройства;
- блок накопления (БН), считывающий данные с выхода аналого-цифрового преобразователя, запоминая и суммируя их;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП), предназначенный для преобразования сигнала, поступающего с выхода согласующего усилителя в цифровую форму;

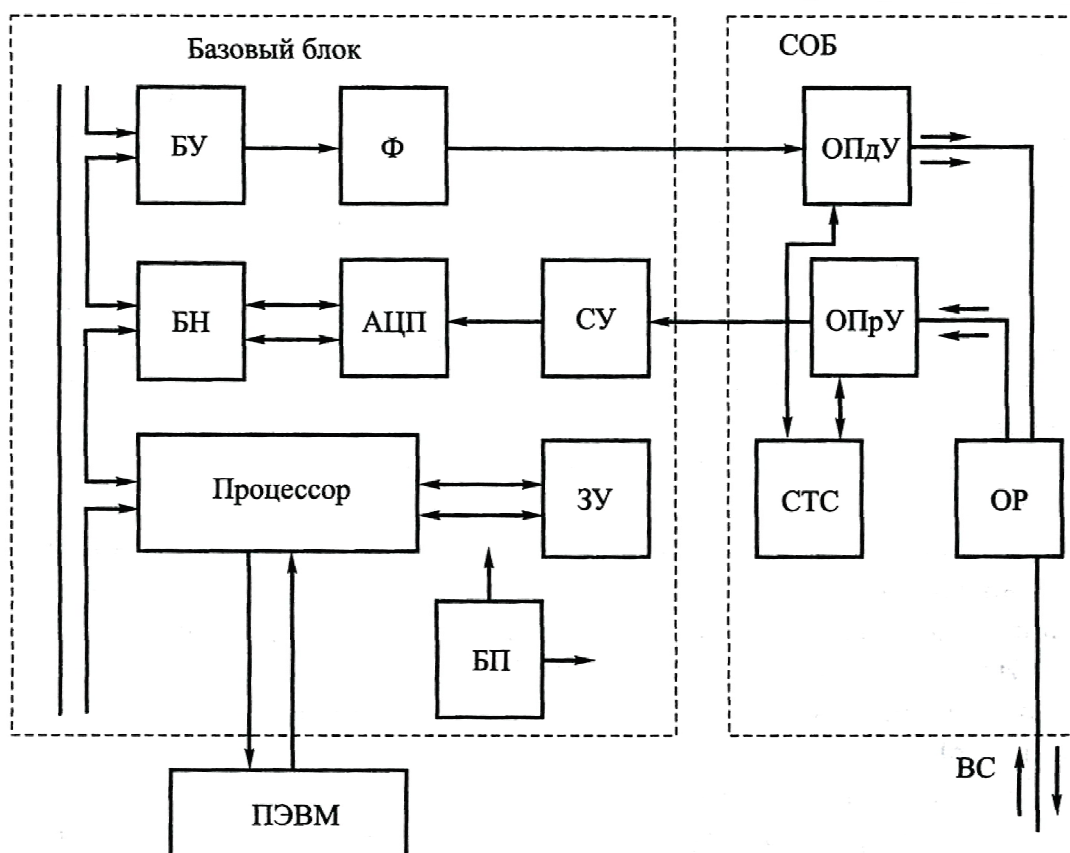


Рис. 5.6. Структурная схема рефлектометра ОР-2-1

- согласующий усилитель (СУ), служащий для согласования уровней сигналов оптического приемного устройства и АЦП;
- запоминающее устройство (ЗУ), предназначенное для запоминания и предварительной обработки данных после нескольких циклов измерения рефлектограммы;
- сменный оптический блок (СОБ), который состоит из оптического передающего устройства (ОПдУ), предназначенного для генерации оптических импульсов с заданной длительностью, оптического приемного устройства (ОПрУ), служащего для регистрации и усиления рассеянного сигнала, и оптического разветвителя (ОР), предназначенного для ввода импульсов в исследуемый ОВ и подачи сигнала обратного рассеяния на ОПрУ;
- схема температурной стабилизации (СТС), поддерживающая постоянными температуру и мощность излучения лазерного диода и температуру лавинного фотодиода;
- процессор, вырабатывающий сигналы управления блоками БУ, БН, ЗУ, считывающий данные с них и осуществляющий связь рефлектометра с ПЭВМ.

Рассмотрим работу рефлектометра. Процессор в соответствии с командами управляющей программы, находящейся в оперативной памяти ПЭВМ, вырабатывает код для запуска оптического импульса с помощью блоков БУ, Ф и ОПдУ. При прохождении этого импульса по ВС часть энергии рассеивается и поступает на ОПрУ, где преобразуется и усиливается. Длительность сигнала обратного рассеяния на выходе ОПрУ равна двойному времени прохождения света по ОВ. Через СУ данный сигнал поступает на вход АЦП и преобразуется в цифровую форму. Работа АЦП синхронизируется блоком управления БУ. За один период запуска оптического импульса АЦП считывает 2048 отсчетов измеряемого сигнала обратного рассеяния. Отсчет, взятый в момент времени t относительно момента запуска оптического импульса, соответствует сигналу, рассеянному от точки ОВ, находящейся на расстоянии

$$Z = \frac{ct}{2n}, \quad (5.3)$$

где c — скорость света в вакууме;

n — показатель преломления сердцевины ОВ.

Таким образом, за один период запуска оптического импульса измеряются сигналы, пришедшие от большого числа точек ВС.

Каждый отсчет, преобразованный АЦП в цифровую форму, запоминается БН. Для точного измерения обратного рассеянного сигнала осуществляется многократный запуск оптического импульса. При этом в БН усредняются отсчеты, соответствующие одинаковым точкам ВС, и увеличивается отношение сигнал/шум. По команде процессора сигнал из БН передается в ЗУ, регистры памяти БН очищаются, и процесс измерения и усреднения сигнала в нем повторяется. После нескольких таких циклов полученные значения сигнала дополнительно усредняются в ЗУ, запоминаются в нем, передаются в ПЭВМ и отображаются на экране в виде рефлектограммы ОВ. Для повышения точности измерений оператор, работающий с рефлектометром, может увеличить число усреднений рефлектограммы N_{rep} , установив в режиме «Meas» величину, которая может изменяться от 1 до 255, напрямую влияя на время измерения.

СТС поддерживает постоянной температуру лазерного диода и лавинного фотодиода. Эти элементы входят в состав ОПдУ и ОПрУ соответственно и установлены на отдельных радиаторах, температура которых контролируется с помощью терморезисторов и СТС.

5.2.4. Меры безопасности при эксплуатации рефлектометра

По степени защиты от поражения электрическим током рефлектометр относится к классу III в соответствии с требованиями ГОСТ 26104-89, а источник питания ИП-2-1 — к классу I в соответствии с требованиями ГОСТ 26104-89.

При эксплуатации рефлектометра следует руководствоваться «Правилами техники безопасности и промышленной санитарии в электронной промышленности» и «Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров № 2392-81».

Рефлектометр может обслуживать оператор, имеющий квалификационную группу не ниже третьей.

Во избежание попадания в глаза импульсного лазерного излучения нельзя производить подключение и отключение ВС к рефлектометру в режиме «Meas» (когда включен лазер).

Включение источника питания ИП-2-1 в сеть 220 В, 50 Гц необходимо производить через заземленную розетку.

5.3. Изучение принципа действия и программного обеспечения рефлектометра

5.3.1. Подготовка рефлектометра к работе

Рефлектометр предназначен для измерения затухания в волоконных световодах и их соединениях, длины ОВ и расстояния до любого их участка. Он состоит из базового блока, сменных оптических блоков, ПЭВМ типа «notebook», источника питания и соединительных кабелей. Существуют рефлектометры со встроенным компьютером и с возможностью подключения к внешней ПЭВМ. Рассмотрим второй тип рефлектометра.

На передней панели базового блока находятся выключатель питания и индикаторный светодиод «Сеть». Справа от базового блока установлен сменный оптический блок (СОБ).

На задней панели базового блока располагаются разъемы:

- «=12 В» — для подключения кабеля питания;
- «ЭВМ» — для подключения интерфейсного кабеля для соединения с ПЭВМ;
- «3А» — держатель предохранителя.

Базовый блок и ПЭВМ подключаются к внешнему источнику питания (12 ± 2) В при помощи кабеля с двумя однополюсными вилками (красная вилка — «+» питания, синяя — «-»). На этом блоке розетка «РС7» кабеля подключается к вилке «=12 В». От розетки «РС7» имеется отвод, свободный разъем которого присоединяется к гнезду питания ПЭВМ.

При питании рефлектометра от сети 220 В, 50 Гц выходной кабель источника питания ИП-2-1 подключается к базовому блоку и ПЭВМ, как описано выше, а ко входу ИП-2-1: — кабель питания от сети 220 В.

Базовый блок соединяется с ПЭВМ интерфейсным кабелем (кабель с двумя розетками на 9 контактов), подключаемым на задней панели рефлектометра к разъему «ЭВМ», а на стороне ПЭВМ — к разъему «RS-232».

5.3.2. Включение рефлектометра

После подключения кабеля питания к источнику постоянного тока 12 В и соединения базового блока с ПЭВМ включают рефлектометр выключателем питания, расположенным на передней панели базового блока, при этом загорается индикаторный светодиод «Сеть».

Измеряемый ОВ присоединяют к рефлектометру через оптический разъем или приваривают к короткому отрезку ОВ, уже вставленному в этот разъем. Затем включают ПЭВМ типа «notebook» и выполняют операции в соответствии с руководством по ее эксплуатации.

5.3.3. Загрузка программного обеспечения

Можно использовать программное обеспечение рефлектометра, выполненное на базе операционной системы DOS либо Windows. Оно находится в каталогах «OTDR-C» и «OTDR-M» на жестком диске ПЭВМ и дискете, поставляемой в комплекте рефлектометра.

Если ПЭВМ имеет цветной экран, то программное обеспечение следует загружать из каталога «OTDR-C», в противном случае — из каталога «OTDR-M».

В «OTDR-C» («OTDR-M») находятся:

- файл 500meas.bat, с помощью которого осуществляется запуск программы управления работой рефлектометра (из системы DOS);
- каталог «OR», содержащий программу управления работой рефлектометра opt500to.exe и другие файлы, необходимые для работы рефлектометра;
- каталог «REF», в который по умолчанию записываются в режиме «Save» файлы с рефлектограммами и откуда они считываются в режиме «Load».

При изменении структуры каталогов на жестком диске или при создании новой дискеты для работы с рефлектометром необходимо обязательно создавать каталоги с именами «OR» и «REF» и переписывать в них соответствующие файлы (каталог «REF» сначала может быть пустым).

Для загрузки программного обеспечения из системы DOS следует войти в каталог «OTDR-C» или «OTDR-M» и запустить на выполнение файл 500meas.bat. При этом происходит загрузка управляющей программы opt500to.exe и, кроме того, осуществляется инициализация процессора базового блока.

Программным обеспечением можно пользоваться и отдельно от рефлектометра. При этом будут выполняться все его функции, кроме «Meas». При загрузке управляющей программы в этом случае в информационной строке появится надпись: «OP-500/0». Она же возникнет и при отсутствии связи базового блока с ПЭВМ, когда управляющая программа загружалась, если он был выключен или по-

врежден интерфейсный кабель (на отсутствие связи с ПЭВМ указывает цифра 0 в надписи ОР-500/0).

5.3.4. Программное обеспечение рефлектометра

Основное меню программы управления рефлектометром.

После загрузки программы на дисплее появляются ее основные меню и поле, на котором будет отображаться рефлектограмма. Ниже этого поля расположена информационная строка, в которой при загрузке управляющей программы указываются версия программного обеспечения, порядковый номер рефлектометра (например, ОР-500/63), текущие дата и время.

Перемещение по пунктам меню осуществляется с помощью клавиш «→», «←» (маркером служит светлая рамка вокруг клетки с названием пункта), входение в выбранный режим работы осуществляется клавишей «Enter», а выход из него — клавишей «Esc». Пункты меню имеют вид клавиш клавиатуры компьютера. При входении в выбранный режим такая «клавиша» выглядит нажатой и меняется ее фон.

В левой части экрана при входении в какой-либо режим изображаются три таблицы. В двух верхних таблицах в режиме «View» отображаются значения расстояния и затухания, указывающие положение маркеров относительно измеренной рефлектограммы. В третьей таблице (появляется на экране после входения в режим «Meas») указываются исходные параметры измерения. При записи рефлектограмм в буферную память в левой нижней части экрана в режиме «View» появляется таблица с именами этих рефлектограмм.

Считывание файлов с диска. В режиме «Load» происходит считывание с диска файлов с записанными рефлектограммами и начальными данными измерения для последующего просмотра в режиме «View». После входения в него на экране появляется строка «Name» с именем каталога «Ref» и таблица «Files» с именами записанных файлов.

Выбор нужного файла осуществляется перемещением темного маркера с помощью клавиш «↑», «↓», «←», «→». В отдельной рамке внизу экрана отображаются объем памяти, занимаемый файлом, дата и время его создания. После нажатия клавиши «Enter» в правой части экрана появляются рефлектограмма, записанная в выбранном файле, и сопутствующая ей пояснительная информация, введенная в режиме «Save». Если эту рефлектограмму требуется исследовать подробно, то необходимо выйти из режима «Load», нажав клавишу

«Esc», и перейти в режим «View». Если нужно выбрать другой файл, то, не выходя из режима «Load», следует перевести маркер к другому файлу и повторить указанные выше действия.

Если файл, который необходимо просмотреть, записан не в каталоге «REF», то нужно подвести темный маркер к строке с символами «.\» и нажать клавишу «Enter». Затем следует провести поиск требуемых каталога и файла, как и при работе с оболочкой Norton Commander.

Если файл, который требуется просмотреть, записан не на текущем диске, то необходимо подвести темный маркер к самому первому файлу таблицы «Files» и нажать клавишу «↑». При этом маркер перейдет в верхнюю строку «Name», в которой и следует набрать имя нового диска и каталога, например:

a:\orl*.ref,

где a: — имя нового диска;

orl — имя нового каталога;

*.ref — имя всех файлов с расширением.

Если имя нового каталога набрано неверно, то появляется надпись «Error Invalid directory».

В этой ситуации следует выйти из режима «Load», нажав клавишу «Esc», затем войти в него, нажав «Enter», и повторить действия, указанные выше.

Переименование файлов может быть осуществлено в режиме «LOAD».

Для этого, установив темный маркер на нужном файле, нажать клавишу «F6» и в верхней строке «Rename» изменить его имя так, как это делается при работе с оболочкой Norton Commander. Затем следует нажать клавишу «Enter».

Удаление файлов может быть осуществлено в режиме «Load».

Для этого, установив маркер на нужном файле, нажать клавишу F8. При этом в верхней строке «Delete» появится имя удаляемого файла и вопрос: (Y/N)? Если теперь нажать клавишу «Y», то файл будет удален, если клавишу «N», то удаление не произойдет.

Режим «Save» используется для записи файла с измеренной рефлектограммой и начальными данными измерения на диск.

В этом режиме после нажатия клавиши «Enter» на экране появляются слово «Name» и строка, куда следует занести имя записываемого файла, которое может содержать не более восьми элемен-

тов: латинских букв, цифр и символов «-», «_», «@», «#», «\$», «&». Исправления при наборе имени файла осуществляются с помощью клавиш «Del» и «Backspace».

После набора имени файла надо нажать клавишу «Enter», при этом на экране появляются слово «Info» и строка, в которой можно набрать какой-либо комментарий к рефлектограмме, например, номер кабеля, номер или цвет ОВ, направление измерения и т.п. Он может содержать до 30 символов: латинских и русских букв, цифр и символов, вводимых с клавиатуры. (Если ПЭВМ типа «notebook» поставляется в комплекте с рефлектотометром, переключение с алфавита на алфавит осуществляется одновременным нажатием двух клавиш «Shift» или в соответствии с программным обеспечением, установленным на ПЭВМ).

По окончании набора информации в строке «Info» следует нажать клавишу «Enter» и на диске сохранится файл с начальными данными измерения, рефлектограммой, датой и временем измерения и сообщение из строки «Info». По умолчанию запись производится в каталог «REF» и записанный файл имеет расширение ref.

Файл может быть записан в другой каталог или на дискету, для этого в строке «Name» нужно набрать его имя, например:

a:\orl\abc.ref,

где a: — имя нового дисководов;

orl — имя нового каталога;

abc.ref — имя сохраняемого файла.

После окончания записи файла программа автоматически выходит из режима «Save», строки «Name» и «Info» исчезают и клетка «Save» восстанавливает фон (цвет). Если на дискете нет места для записи нового файла, то надпись «Info» меняется на «Еггог» и в строке под ней появляется надпись «!!!Disc is Full!!!» (диск заполнен). В этом случае необходимо нажать клавишу «Esc», чтобы выйти из режима «Save», и записать файл на другую дискету.

Примечание. Если при наборе информации в строке «Info» использовались русские буквы, то по окончании этой операции следует переключить клавиатуру на вывод латинских букв (например, повторно одновременно нажать левую и правую клавиши «Shift» на клавиатуре), иначе функции, реализуемые нажатиями клавиш с буквами латинского алфавита «D», «S», «H», ... (см. ниже), не будут выполняться.

Режим «Meas» (установка параметров измерения) используется для измерения рефлектограммы ОВ. После входа в него перед проведением измерения устанавливают нужные значения начальных данных в третьей таблице, которая находится в левой части экрана. Изменение всех параметров в ней осуществляется с помощью клавиш «←», «→», а ее строки имеют следующий смысл:

- Unit — указывает тип сменного блока, установленного в рефлектометр. Один из четырех возможных вариантов (ММ-0,85; ММ-1,3; ОМ-1,3; ОМ-1,55) индицируется автоматически (оператор может изменить установку, если это необходимо);

- n — значение показателя преломления ОВ, по умолчанию устанавливается $n = 1,475$;

- L_{\max} — максимальная длина ОВ или линии. Эта величина устанавливается оператором, она должна превышать длину измеряемой линии и может иметь значение 2, 5, 10, 20, 40, 90 или 180 км (при $n = 1,475$); L_{\max} определяет период запуска оптического передающего устройства (лазера), который должен быть больше, чем двойное время прохождения оптического импульса по ОВ;

- L_1 и L_2 — соответственно расстояние до начала и конца измеряемого участка, который затем отображается на экране;

- T_p — длительность оптического импульса; возможные значения T_p указаны в табл. 19 (в конкретных образцах рефлектометров значения длины и длительности импульсов могут отличаться не более чем на 10 %);

Таблица 19

Значения длительности оптического импульса

Тип сменного оптического блока	Длительность импульса T_p , нс					
	30	90	330	1000	3000	10 000
	Динамический диапазон, дБ					
ММ-0,85	18	21	24,5	28	—	—
ММ-1,3	17	20	23,5	27	—	—
ОМ-1,3	13	16	19	22	25,5	29
ОМ-1,55	12	15	18	21	24,5	28

- N_{rep} — количество усреднений рефлектограммы в памяти ПЭВМ; «Meas-fast», «Meas-aver» являются соответственно режимами быстрого отображения измеряемой рефлектограммы или измерения с установленным числом усреднений.

Перед началом измерения устанавливают заданные значения исходных параметров. Для этого с помощью клавиш «↓», «↑» перемещают темный маркер в соответствующую строку и устанавливают значение, как указано выше.

Для проведения измерений после задания значений всех параметров необходимо с помощью клавиш «←», «→» установить режим «Meas-fast» или «Meas-aver» и нажать клавишу «Enter». При этом измеряемая рефлектограмма будет отображаться на дисплее. Между основным полем и информационной строкой располагается шкала расстояний. В правом верхнем углу на экране в режиме «Meas-aver» указывается количество уже проведенных измерений рефлектограммы (от 1 до N_{rep}). Измерение заканчивается и подается звуковой сигнал, когда количество измерений станет равным N_{rep} .

Процесс измерения можно остановить нажатием клавиши «Esc».

Режим «Meas-aver» (измерение с усреднением) предназначен для измерения ВС с последующим исследованием его параметров в режиме «View». При этом рефлектограмма усредняется и процесс усреднения отображается на экране.

Значения начальных данных, устанавливаемые оператором в режиме «Meas-aver» в нижней таблице в левой части экрана, зависят от предполагаемых параметров ОВ (линии): длины и среднего затухания. При измерении этих характеристик с помощью оптического рефлектометра значение измеряемого полного затухания (динамический диапазон) увеличивается пропорционально росту длительности оптического импульса, одновременно увеличивая абсолютную погрешность измерения расстояний

$$DL = cT_p / 2n, \quad (5.4)$$

где c — скорость света в вакууме.

Например, длительности импульса $T_p = 90$ не соответствует значение абсолютной погрешности измеряемого расстояния $DL = 9$ м. Повысить динамический диапазон можно за счет увеличения количества усреднений N_{rep} (на 0,75 дБ при удвоении N_{rep}), но при этом возрастает время измерения.

Из сказанного выше следует, что если измеряется линия длиной в несколько километров с затуханием оптической мощности до 10 дБ, то достаточную точность можно обеспечить при длительности оптического импульса 30 или 90 нс для многомодовых ОВ и при дли-

тельности, меньшей 1 мкс — для одномодовых ОВ. Количество медленных усреднений N_{rep} может быть от 1 до 9. Для получения максимального динамического диапазона и исследования затухания в неоднородностях на дальних участках длинных линий следует увеличивать длительность импульса и количество усреднений.

Значение длины L_{max} , устанавливаемое перед началом измерения, должно быть больше значения длины измеряемой линии. Если значение длины линии близко к значению L_{max} (составляет более 2/3 ее значения), то наличие в сигнале обратного рассеяния мощного импульса, отраженного от заднего торца ОВ, может привести к небольшим искажениям затухания на дальних участках линии или к появлению на гладком участке рефлектограммы ложных отраженных импульсов. Во избежание этого рекомендуется увеличивать значение L_{max} .

В режиме измерения «Meas-fast» (быстрое измерение) рефлектограмма выводится на экран с определенной периодичностью, при этом картина полностью обновляется и усреднение не производится. Данный режим в основном используется при юстировке двух ОВ перед их сваркой. Число N_{rep} в этом режиме задает скорость смены картины и, чем оно больше, тем реже меняется рефлектограмма.

Выход из режима «Meas» и переход в другой может быть осуществлен с помощью клавиш «Esc», «←», «→», «Enter». Для быстрого перехода в режимы «Load», «Save», «View», «Help», «Print» используются соответственно клавиши «L», «S», «V», «H» и «P».

Режим «View» используется для просмотра измеренной или считанной в режиме «Load» рефлектограммы.

Типичная рефлектограмма ОВ приведена на рис. 5.7, где по горизонтальной оси откладывается расстояние вдоль ОВ, а по вертикальной — затухание в децибелах. Рефлектограмма однородного ОВ в этих координатах представляет собой прямую линию с наклоном, пропорциональным затуханию в ОВ.

На начальном участке ab (см. рис. 5.7) рефлектограмма искажена из-за того, что отраженный от входного торца ОВ сигнал значительно (примерно в тысячу раз) превышает полезный рассеянный сигнал и вводит ОПРУ в состояние насыщения. Вследствие этого на рефлектограмме появляется область, называемая *мертвой зоной*, в пределах которой амплитуда отображаемого сигнала равна максимально возможной и остается постоянной при изменении расстояния.

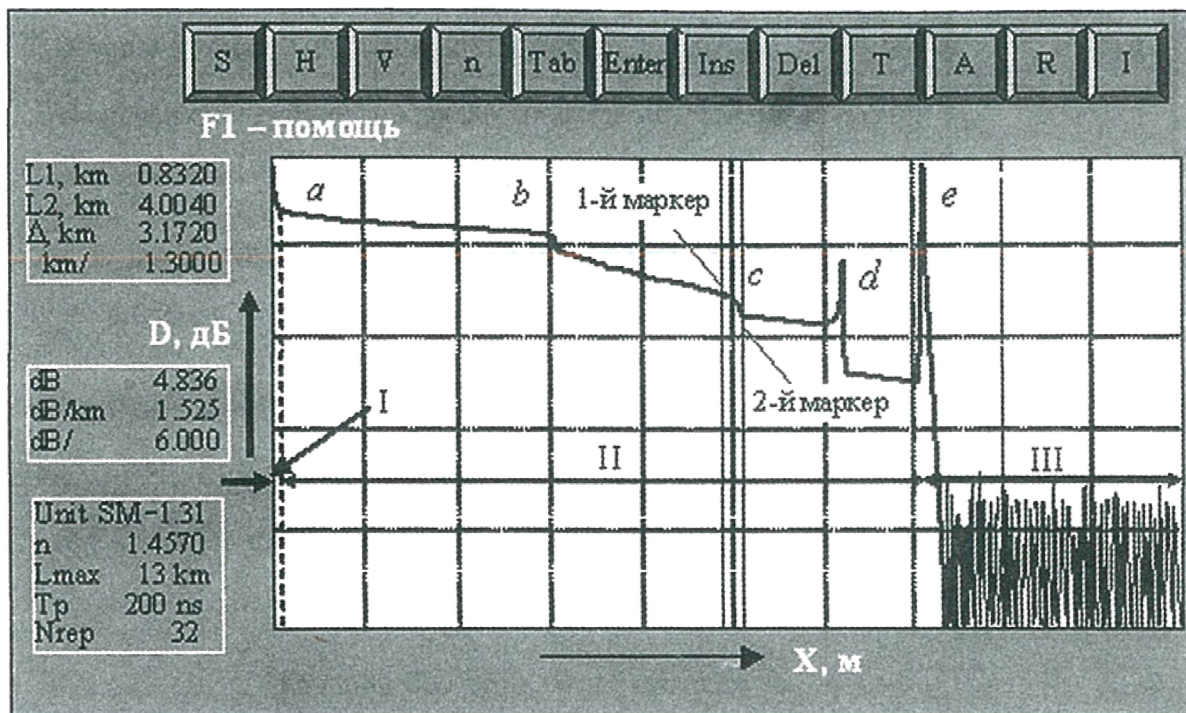


Рис. 5.7. Рефлектограмма ОВ:
I — мертвая зона; II — рабочая область; III — зона шумов

При соединении двух ОВ на рефлектограмме появляется скачок, обусловленный затуханием в соответствующем месте. Точка *c* (см. рис. 5.7) отмечает неразъемное (сварное) соединение. В разъемном соединении, кроме того, наблюдается сигнал, отраженный от торцов соединяемых ОВ (точка *d*). Отражение света происходит также от дефектных мест ОВ и его дальнего конца (точка *e*).

При большом затухании в линии рассеянный сигнал становится очень слабым и неразличимым на фоне шумов ОПрУ даже при длительном усреднении.

В режиме «View» на дисплее отображаются два подвижных вертикальных маркера, положение которых фиксируется в двух верхних таблицах в левой части экрана (рис. 5.8) для определения характеристик ОВ.

В правом верхнем углу основного поля записывается номер текущего измерения (например, meas. 5) или имя файла, считанного с диска в режиме «Load» (например, abcd.ref).

Для такого файла в информационную строку внизу экрана выводятся сообщение, которое было записано в строке «Info» при записи файла в режиме «Save», дата и время измерения этого файла.

L , км	1,2030	- положение левого маркера относительно начала ВС;
L , км	2,8310	- положение правого маркера относительно начала ВС;
DL , км	1,6270	- расстояние между двумя маркерами;
км	0,4070	- масштаб по горизонтальной шкале расстояний.

DB , км	2,51	- полное затухание между точками пересечения маркеров с рефлектограммой;
db , км	1,55	- значение потерь в децибелах на километр между этими точками;
db	6,00	- масштаб по горизонтальной шкале затухания.

Рис. 5.8. Положение маркеров на рефлектограмме:
a — по оси расстояний; *б* — по оси уровней

Левый маркер можно передвигать по экрану с помощью клавиш «←» и «↑», а правый — с помощью клавиш «→» и «↓». Вместе оба маркера перемещаются, если одновременно нажать клавиши «Ctrl» и «←» (перемещение влево) или «Ctrl» и «→» (перемещение вправо).

В этом режиме в верхней части экрана появляется меню, в котором указаны функции, позволяющие определять характеристики ВС и сравнивать рефлектограммы друг с другом.

Для реализации функций, заложенных в программе, можно использовать клавиши клавиатуры или меню с подсказками. Для выполнения какой-либо функции этого меню следует нажать клавишу F10, перевести маркер-рамку с помощью клавиш «←», «→» к соответствующему пункту меню и нажать клавишу «Enter». Такой же результат можно получить, если нажать клавишу с буквой, обозначающей данный пункт меню (или одновременно две клавиши — «Alt» и «H» или «Alt» и «V»).

(При последующем изложении будет в основном использоваться второй способ их реализации.)

Если после нажатия клавиши «F10» никакая функция этого меню не выполнялась (не была нажата клавиша «Enter»), то выйти из меню с подсказкой можно повторным нажатием клавиши «F10».

Для измерения затухания на каком-либо участке ВС и его длины следует установить маркеры на концы участка и прочесть его ха-

рактеристики в таблицах, выведенных на дисплей. При измерении затухания левый маркер должен быть установлен за пределами мертвой зоны.

Для повышения точности измерений участок рефлектограммы между маркерами может быть аппроксимирован прямой линией, которая после нажатия клавиши «D» отображается на экране, а над ней указывается рассчитанное значение затухания. Этот режим отменяется нажатием любой клавиши.

Данный способ измерения следует применять к однородным участкам ВС, не имеющим соединений.

При измерении расстояния до неоднородности оптического волокна маркер устанавливается на изображении ее левого края, а расстояние определяется по таблице, расположенной в левой верхней части экрана.

Пределы допустимого значения абсолютной погрешности измеряемого расстояния

$$dL = \pm \left(dl + \frac{Ldn}{n} + 5 \cdot 10^{-5} L \right), \quad (5.5)$$

где $dl = 3$ м (при измеряемых расстояниях, равных 2, 5, 10, 20 км); 6 м (при измеряемых расстояниях, равных 40 и 90 км); 12 м (при измеряемом расстоянии, равном 180 км);

L — длина ВС, м;

dn — погрешность, с которой определен показатель преломления для измеряемого ВС;

n — показатель преломления ВС.

Величина n может устанавливаться в диапазоне от 1,0000 до 2,0000 с шагом 0,0005.

Как следует из формул (5.2), (5.3), точность измерения расстояния по рефлектограмме зависит, в частности, от правильности установленного значения показателя преломления. Если оно неизвестно, а дана точная длина измеряемого ВС, то показатель преломления можно подобрать таким, чтобы длина ВС, измеренная по рефлектограмме, совпала с известной.

Для выполнения процедуры подбора показателя преломления следует установить любой маркер на левый конец ВС и нажать клавишу «N». При этом в нижней таблице, расположенной в левой части экрана, строка со значением показателя преломления n изменит цвет.

Теперь с помощью клавиш «←», «→» можно менять показатель преломления n , и при каждом его изменении будет меняться значение расстояния в верхней таблице. После того, как расстояние до маркера будет равно известной длине измеренного ВС, нужно нажать клавишу «Enter», и тогда подобранное значение показателя преломления n зафиксировано в нижней таблице, а соответствующая строка восстанавливает цвет.

На дисплее часть рефлектограммы, находящуюся между маркерами, можно растянуть по горизонтали и вертикали клавишами «H» и «V» соответственно. Причем рефлектограмма по горизонтали растягивается на всю ширину экрана, а по вертикали — в два раза при каждом нажатии клавиши «V». Восстановление исходной картины осуществляется при одновременном нажатии клавиш «Alt» и «H» либо «Alt», «V». При одновременном нажатии клавиш «Ctrl» и «V» масштаб по вертикали уменьшается не до начального состояния (6 дБ/дел), а в два раза.

Программа позволяет определить затухание в сварном соединении ОВ методом пяти точек.

Для этого следует установить маркеры на участке рефлектограммы, соответствующем сварному соединению (см. рис. 5.7), и нажать клавишу «S». При этом участки ОВ некоторой длины слева от левого и справа от правого маркеров аппроксимируются прямыми линиями и рассчитывается затухание на сварном соединении. Место сварки отмечается вертикальным столбиком, а участки аппроксимации — жирными линиями. Положение маркеров, длина участков аппроксимации и положение вертикального столбика могут меняться независимо друг от друга.

Для изменения положения левого маркера используются клавиши «←» и «↑», правого маркера — клавиши «→» и «↓».

Для изменения длины левого участка аппроксимации необходимо одновременно нажать клавишу «Shift» и одну из клавиш «←», «↑», а правого участка аппроксимации — нажать клавишу «Shift» и одну из клавиш «→», «↓».

Вертикальный столбик следует установить на левый край участка сварного соединения, для его перемещения необходимо одновременно нажать клавишу «Ctrl» и одну из клавиш «←», «→».

Измеренное затухание на сварном соединении индицируется значением над вертикальным столбиком.

Значение измеренного затухания и ординаты участка линии или соединения ОВ могут быть зафиксированы и отмечены непосредственно на рефлектограмме.

Для того чтобы отметить положение и затухание какого-либо участка ОВ, необходимо установить маркеры на концах этого участка и одновременно нажать клавиши «Ctrl» и «Enter». При этом на рефлектограмме фиксируются ординаты маркеров и полное затухание между ними.

Если требуется отметить участок ОВ и среднее километрическое затухание на нем, то сначала следует нажать клавишу «D», а затем — одновременно клавиши «Ctrl» и «Enter». При этом на рефлектограмме фиксируются положения маркеров и затухание между ними в децибелах на километр.

Если требуется отметить соединение ОВ, то после нажатия клавиши «S» и выполнения действий как при измерении затухания в сварном соединении также необходимо одновременно нажать клавиши «Ctrl» и «Enter». При этом на рефлектограмме фиксируются положение центрального столбика и значение затухания в соединении.

Отмеченные параметры отображаются при распечатке рефлектограммы и сохраняются при записи ее на диск.

Для отмены любых отметок параметров ОВ (ординаты участков, потери оптической мощности) следует установить маркеры так, чтобы отметки оказались между ними, и нажать одновременно клавиши «Alt» и «S».

В режиме «View» можно проводить сравнение нескольких рефлектограмм, например, одного и того же ОВ, измеренных в разное время. Для этого рефлектограмму, отображаемую в данный момент времени на экране дисплея (ее будем называть активной), нужно записать в буферную память, нажав клавишу «Enter», что приведет к появлению в левом нижнем углу экрана еще одной (четвертой) таблицы, в которой указывают имена файлов, находящихся в буферной памяти.

Затем измеряют или считывают с диска другую рефлектограмму и воспроизводят ее в режиме «View» (имя ее записывается в правом верхнем углу экрана). Для сравнения ее с рефлектограммой, находящейся в буферной памяти, следует нажать клавишу «Ins», и две рефлектограммы будут одновременно отображаться на экране. При сравнении рефлектограмм их можно растягивать по горизонтали и вертикали для более подробного просмотра.

Для удаления рефлектограммы с экрана (но не из буферной памяти) необходимо повторно нажать клавишу «Ins».

Измерение затухания и длины ВС с помощью маркеров можно проводить только для одной из наблюдаемых одновременно рефлектограмм, а именно для активной, имя которой записано в правом верхнем углу экрана (при работе с цветным монитором оно изображается синим цветом). Для измерения параметров (длины и затухания ОВ) на другой рефлектограмме необходимо перевести ее из буферной памяти в активную, нажав клавишу «Tab», при этом первая рефлектограмма запишется в буферную память на место второй, а их имена в нижней части экрана поменяются местами (на цветном дисплее поменяются и цвета, которыми они изображены). Кроме измерения длины и затухания ОВ по рефлектограмме, переведенной из буферной памяти в активную, рефлектограмму можно записывать в режиме «Print».

В буферную память можно записать только 8 рефлектограмм. Запись производится, как указано выше, нажатием клавиши «Enter». При этом в таблицу буферной памяти вносится новое имя рефлектограммы.

Любую рефлектограмму, хранящуюся в буферной памяти, можно воспроизвести на экране. Для этого необходимо с помощью клавиш «PgDn» и «PgUp» выбрать в нижней левой таблице буферной памяти нужную рефлектограмму (подвести к ней темный маркер) и нажать клавишу «Ins», возле имени отображаемого файла при этом появляется знак «*». Таким образом можно одновременно отобразить на экране все рефлектограммы из буферной памяти.

Рефлектограмму можно стереть из буферной памяти. Для этого необходимо с помощью клавиш «PgDn» и «PgUp» подвести темный маркер к ее имени в нижней левой таблице и нажать клавишу «Del». Если стерты все рефлектограммы, то исчезает и таблица.

Для измерения коэффициента отражения от разъёмного соединения двух ВС или от конца ВС следует правый маркер установить на вершине отраженного импульса, левый — на участке рефлектограммы непосредственно перед ним, после чего нажать клавишу «R».

Рефлектограмма, отображаемая в режиме «View», может быть снабжена пояснительной информацией. Для этого необходимо нажать клавишу «I» и в появившейся на экране строке «Info» набрать требуемое сообщение, как при записи файла на диск. Затем после

нажатия клавиши «Enter» это сообщение перепишется в информационную строку в нижней части экрана и будет сопровождать рефлектограмму при записи ее в буферную память и на диск.

При вхождении в режим «Help» на экране появляется описание назначения клавиш, используемых при работе с рефлектометром.

Режим «Print» используется для печати измеренной рефлектограммы и исходных параметров участка ОВ.

Если управляющая программа загружалась из операционной системы Windows 95, то для распечатки рефлектограммы (или ее участка) необходимо выполнить следующие действия:

- войти в режим «Print» — на экране появляется рефлектограмма (или ее участок), изображенная черным цветом на белом фоне;
- нажать клавишу «PrtSc» («Print Scrn») — для занесения рефлектограммы в буфер обмена ПЭВМ;
- нажать клавишу «Alt» и, не отпуская ее, нажать клавишу «Tab», чтобы на экране появился рабочий стол Windows;
- загрузить текстовый редактор WordPad (или Word) или графический редактор Paint;
- в меню выбранного редактора нажать на кнопку «Вставка из буфера», после чего на экране появляется изображение рефлектограммы из режима «Print», которое можно распечатать на принтере, нажав на кнопку меню редактора «Печать»;
- после окончания печати нажать клавишу «Alt» и, не отпуская ее, нажать клавишу «Tab» — на экране появляется меню управляющей программы opt500q.exe.

Во избежание утери полученной информации при возможном сбое в работе «notebook» печать рефлектограмм целесообразно осуществлять, предварительно сохранив ее на диске.

Если управляющая программа opt500q.exe работает в операционной системе DOS, то перед ее запуском необходимо загрузить программу graphics.exe (или graphics.com), соответствующую версии установленной DOS, а для распечатки рефлектограммы (или ее участка) выполнить следующие действия:

- войти в режим «Print», при котором на экране появляется рефлектограмма (или ее участок), изображенная черным цветом на белом фоне;
- нажать любую клавишу, при этом произойдет инверсия цветов рефлектограммы и фона;

- нажать клавишу «PrtSc» («Print Screen»), чтобы распечатать рефлектограмму.

Выход из управляющей программы. Для выхода из управляющей программы после завершения работы с рефлектометром следует подвести маркер-рамку основного меню к пункту «Quit» и нажать клавишу «Enter».

5.4. Методика поверки оптического рефлектометра

5.4.1. Порядок, средства и условия проведения поверки рефлектометра

Последовательность обязательных операций поверки рефлектометра приведена в табл. 20.

Таблица 20

Последовательность операций поверки

Наименование операции поверки	Номер пункта методики поверки	Обязательность проведения операций		
		при выпуске из производства	при выпуске из ремонта	при эксплуатации и хранении
Внешний осмотр, проверка комплектности, опробование	5.4.4.1 I 5.4.4.2 II	Да	Да	Да
Определение рабочей длины волны оптического излучения на выходе рефлектометра	5.4.4.3.1 III	»	Нет	Нет
Определение диапазона измерения расстояний и основной абсолютной погрешности измерения расстояний	5.4.4.3.2 IV	Да	Да	Да
Определение динамического диапазона рефлектометра	5.4.4.3.3 V	»	»	»
Определение основной абсолютной погрешности измерения затухания	5.4.4.3.4 VI	»	»	»
Определение минимальной дискретности отсчета при измерении затухания и расстояния	5.4.4.3.5 VII	»	»	Нет

При проведении поверки должны применяться средства, указанные в табл. 21.

Таблица 21

Средства поверки

Наименование и тип средства поверки	Метрологические и основные технические характеристики средства поверки
Спектральная установка, включающая в себя монохроматор и фотоприемное устройство	Спектральный диапазон чувствительности — 1,4—1,7 мкм
Оптический генератор ОГ-2-1	Диапазон нормируемого расстояния 250 км Длина волны излучения 1310 ± 30 — 1550 ± 30 нм Погрешность установки расстояний не более $\pm(0,2 + 1 \cdot 10^{-5})$ м Диапазон нормируемых затуханий 0,5—30 дБ Температура эксплуатации от +10 до +30 °С Относительная влажность воздуха 0—80 % Атмосферное давление 84—106,6 кПа Температура хранения от -10 до +50 °С
Волоконный световод: Одномодовый	Длина ОВ не менее 3 км
Многомодовый	Длина ОВ не менее 1 км

Примечание. Разрешается применение других средств поверки, обеспечивающих указанные параметры и аттестованных в соответствующих организациях.

При проведении поверки должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающей среды 20 ± 5 °С;
- относительная влажность воздуха 65 ± 5 %;
- атмосферное давление 720—780 мм рт. ст. (96—104 кПа);
- напряжение питающей сети $220,0 \pm 6,6$ В;
- частота питающей сети $50,0 \pm 0,2$ Гц.

5.4.2. Проведение поверки

I. *Внешний осмотр.* При проведении внешнего осмотра необходимо:

- проверить комплектность рефлектометра, наличие и сохранность пломб;
- убедиться в отсутствии видимых механических повреждений корпусов и органов управления;
- очистить оптические детали от пыли и грязи, протерев их тампоном, смоченным в ректифицированном спирте;

- прогреть все средства измерений и подготовить их к работе согласно руководству по эксплуатации.

II. *Опробование.* Для опробования рефлектометра к нему следует подключить волоконный световод с известными длиной и затуханием, провести измерение и сравнить полученные результаты и рефлектограмму с параметрами световода.

III. *Определение метрологических характеристик.*

Для определения длины волны оптического излучения выход СОБ соединяют со входом спектральной установки оптическим кабелем длиной 3—5 м. Изменяя длину волны по шкале установки, находят максимум сигнала на выходе спектральной установки, при этом длина волны на ее шкале соответствует длине волны оптического излучения рефлектометра.

Длину волны измеряют для каждого СОБ.

Результаты проверки считают удовлетворительными, если длина волны оптического излучения на выходе СОБ соответствует значениям, указанным в табл. 15.

IV. Проверку диапазона измеряемого расстояния производят, устанавливая поочередно все возможные значения максимального расстояния зондирования L_{\max} и проводя измерения с подключенным волоконным световодом. Считывают с дисплея ПЭВМ максимальное значение шкалы расстояния в режиме «View».

Проверку основной абсолютной погрешности измерения расстояния проводят с помощью оптического генератора ОГ-2-1, подсоединенного к оптическому рефлектометру.

Значение погрешности определяется для каждого из имеющихся в составе рефлектометра СОБ и каждого допустимого для данного СОБ диапазона измеряемых расстояний.

Длина волны измерительного импульса оптического генератора ОГ-2-1 должна соответствовать длине волны установленного СОБ.

Для определения основной абсолютной погрешности измерения расстояния необходимо:

- установить в режиме «Meas» для выбранного диапазона расстояния L_{\max} следующие параметры измерения: $n = 1,499$; $L_1 = 0$; $L_2 = L_{\max}$; длительность зондирующего импульса $T_p = 30$ или 90 нс;
- установить в файле данных программы управления генератором ОГ-2-1 количество измерительных импульсов ТУ от 7 до 10 и запустить программу;

- включить рефлектометр в режиме «Meas-fast» и с помощью аттенуаторов оптического генератора ОГ-2-1 установить амплитуду импульсов такой, чтобы она не вызывала насыщения рефлектометра, т.е. равной примерно 2/3 всей вертикальной шкалы экрана рефлектометра. После установки амплитуды импульсов остановить измерение в этом режиме;

- установить в режиме «Meas» для выбранного диапазона расстояния L_{\max} следующие параметры измерения: $n = 1,499$; $L_1 = 0$; $L_2 = L_{\max}$; $T_p = 30$ или 90 нс; $N_{rep} = 64$;

- включить рефлектометр в режиме «Meas-aver». После завершения работы рефлектометра в этом режиме следует измерить расстояние от начала координат до переднего фронта для каждого из импульсов.

При измерении расстояния по рефлектометру маркер следует устанавливать на ту точку переднего фронта импульса, которая находится на 7 дБ ниже плоской части его вершины (значение 7 дБ отсчитывается по шкале затухания рефлектометра).

Повторить измерения расстояния до импульса m раз ($m \geq 5$);

- для каждого из импульсов рассчитать среднее измеренное расстояние до импульса по формуле

$$L = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m L_k, \quad (5.6)$$

где L_k — результат k -го измерения расстояния до импульса.

Рассчитать погрешность измерения расстояния до импульса по формуле

$$\Delta = 1,1 \sqrt{\Theta^2 + (L - L_0)^2}, \quad (5.7)$$

где Θ — погрешность оптического генератора ОГ-2-1;

L_0 — значение расстояния до импульса, задаваемое оптическим генератором ОГ-2-1.

Результаты проверки считают удовлетворительными, если измеренные значения погрешности не превышают значения, рассчитанного в п. 5.2.2.

Проверку динамического диапазона рефлектометра производят при всех значениях длительности зондирующего импульса для данного СОБ при L_{\max} не менее 20 км и числе усреднений $N_{rep} = 64$.

V. Для определения динамического диапазона к рефлектометру подключается волоконный световод (много- или одномодовый — в соответствии с типом установленного СОБ) и производится измерение в режиме «Meas-aver». Динамический диапазон рефлектометра определяют как разность в децибелах между уровнем сигнала, рассеянного от ближнего к рефлектометру конца измеряемого волоконного световода, и максимальным уровнем шума. Результаты проверки считают удовлетворительными, если измеренные значения динамического диапазона не меньше значений, указанных в п. 5.3.4.

Рефлектограммы, полученные при измерении динамического диапазона, следует сохранить на диске. Уровень сигнала, рассеянного от ближнего к рефлектометру конца измеряемого волоконного световода, и значение мертвой зоны при всех значениях длительности импульсов необходимо запомнить.

VI. Проверку основной абсолютной погрешности измерения затухания выполняют с помощью оптического генератора ОГ-2-1, подсоединенного к оптическому рефлектометру.

Проверку выполняют при длительности оптического импульса рефлектометра 30, 90, 1000 и 10 000 нс. Диапазон измеряемого расстояния при этом выбирается в соответствии с выражением

$$L_{\max} \geq D/\alpha, \quad (5.8)$$

где D — динамический диапазон при заданной длительности импульса рефлектометра;

α — типичное затухание ОВ для данного типа СОБ.

Например, для СОБ ОМ-1,3 мкм при $T_p = 90$ нс; $D = 14$ дБ и $\alpha = 0,5$ дБ/км расстояние $L_{\max} = 40$ км.

Проверку на каждой длительности оптического импульса рефлектометра проводят при последовательно вносимом затухании в амплитуду измерительного импульса оптического генератора ОГ-2-1 B , равном примерно 0,5; 1; $(D - 2)/4$; $(D - 2)/2$; $3(D - 2)/4$ дБ, где D — динамический диапазон рефлектометра с установленным СОБ при заданной длительности оптического импульса рефлектометра.

Для определения основной абсолютной погрешности измерения затухания необходимо выполнить следующие действия:

- установить в файле данных программы управления оптическим генератором ОГ-2-1;
- номер измерительного канала таким, чтобы длина его волны соответствовала длине волны СОБ;

- длительность импульсов не менее 1 мкс при установленном диапазоне расстояния больше 20 км;
- число измерительных и опорных импульсов N , равное единице;
- расстояние до опорного импульса, равное примерно $L_{\max}/2$, а до измерительного импульса — несколько большим, чем значение мертвой зоны для заданной длительности оптического импульса рефлектометра;
- запустить программу управления генератором ОГ-2-1;
- включить рефлектометр в режиме «Meas-fast» и с помощью аттенюаторов оптического генератора ОГ-2-1 установить значения амплитуды опорного и измерительного импульсов равными примерно (с точностью 0,5 дБ) значению амплитуды сигнала, рассеянного от ближнего к рефлектометру конца волоконного световода. После установки амплитуды импульсов остановить измерение в этом режиме;
- включить рефлектометр в режиме «Meas-aver» при $N_{rep} = 64$. После завершения работы рефлектометра в этом режиме следует в режиме «View» измерить разность A_0 между амплитудами опорного и измерительного импульсов, установив маркеры на плоские части вершин импульсов, значение A_0 необходимо запомнить;
- оптический генератор ОГ-2-1 перевести в режим измерения мощности, зафиксировать текущее значение амплитуды измерительного импульса в качестве нулевого, а затем с помощью аттенюатора оптического генератора ОГ-2-1 уменьшить амплитуду измерительного импульса на B дБ (значения B указаны выше);
- запомнить значение B (значение внесенного затухания);
- включить рефлектометр в режиме «Meas-aver» при $N_{rep} = 64$. После завершения работы рефлектометра в этом режиме следует в режиме «View» измерить разность A_{ik} между значениями амплитуды опорного и измерительного импульсов, установив маркеры на плоские части вершин импульсов. Перевести рефлектометр в режим «Meas-aver» и повторить измерение m раз ($m \geq 5$);
- рассчитать среднее затухание, измеренное рефлектометром, по формуле

$$A = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (A_{ik} - A_0), \quad (5.9)$$

оценку среднего квадратического отклонения результата измерения затухания

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (A_{1k} - A_0)^2}{m(m-1)}}, \quad (5.10)$$

и погрешность измерения затухания рефлектометром, дБ,

$$\Delta = 1,1\sqrt{\Theta^2 + (A - B)^2} + tS, \quad (5.11)$$

где Θ — погрешность измерения оптическим генератором ОГ-2-1 внесенного затухания;

t — коэффициент распределения Стьюдента, равный 2776 при доверительной вероятности $p = 0,95$ и числе измерений затухания рефлектометром $m = 5$.

Результаты проверки считают удовлетворительными, если максимальное значение погрешности измерения затухания, полученное при измерении на всех указанных в этом пункте значениях длительности импульсов и во всех точках диапазона шкалы затухания рефлектометра, не превышает 0,05 дБ.

VII. Определяют минимальную дискретность отсчета при измерении затухания и минимальную дискретность отсчета при измерении расстояния.

Проверку минимальной дискретности отсчета при измерении затухания проводят по какой-либо ранее измеренной рефлектограмме в режиме «View» при максимальном масштабе шкалы затухания. По экрану дисплея определяют дискретность отсчета измеряемого затухания, которая должна быть не более 0,001 дБ.

Проверку минимальной дискретности отсчета при измерении расстояния проводят по экрану дисплея на всех диапазонах измеряемых расстояний в режиме «View» при максимальном масштабе.

Результаты проверки считают удовлетворительными, если дискретность отсчета не превышает значений, приведенных в п. 5.2.2.

Положительные результаты поверки оформляются в виде свидетельства о поверке установленной формы или записи в паспорте на рефлектометр и заверяются поверителем с нанесением оттиска поверительного клейма.

Рефлектометр, не соответствующий по результатам поверки техническим требованиям (имеющий отрицательные результаты поверки), к дальнейшей эксплуатации не допускается.

5.4.5. Оптический локатор-рефлектометр ВЛ-5

Рефлектометр ВЛ-5 предназначен для измерения затухания в оптических волокнах и их соединениях, длины оптического волокна и расстояния до любого его участка. Локатор-рефлектометр ВЛ-5 может применяться при строительстве, монтаже, эксплуатации и ремонтных работах на ВОЛП.

Достоинствами прибора являются: возможность считывания и полного анализа рефлектограмм, измеренных в режиме локатора; две кнопки управления в режиме локатора; быстрый и точный анализ параметров неоднородностей в линии (измерение затухания и коэффициента отражения в неоднородностях); прочный герметичный корпус, соответствующий стандарту IP65.

Общая характеристика ВЛ-5:

- два режима работы — режим локатора (автономный режим); режим рефлектометра (под управлением ПЭВМ);
- отображение на встроенном графическом дисплее расстояния до места повреждения и вида неоднородности;
- автоматическое сохранение полученных рефлектограмм в энергонезависимой памяти прибора;
- считывание рефлектограмм в ПЭВМ в формате BELLCORE.

Возможности локатора-рефлектометра в режиме локатора:

- автоматическое определение расстояния до неоднородностей или места повреждения ОВ;
- индикация всех неоднородностей в линии;
- хранение результатов измерений (128 рефлектограмм);
- возможность изменения значения показателя преломления ОВ.

Возможности локатора-рефлектометра в режиме рефлектометра:

- функционирование в качестве полноценного рефлектометра под управлением ПЭВМ;
- программное обеспечение, позволяющее получить на экране ПЭВМ полную рефлектограмму измерений линии и определить все необходимые характеристики ВОЛП.

Технические характеристики локатора-рефлектометра ВЛ-5 приведены в табл. 22.

Технические характеристики лоатора-рефлектометра ВЛ-5

Тип оптического волокна	ОМ
Длина волны, нм	1550 ± 20
Максимальный диапазон расстояний, км	120
Динамический диапазон (ОСШ = 1), дБ	30
Мертвая зона при измерении затухания, м	10
Мертвая зона при обнаружении неоднородностей, м	35
Погрешность измерения расстояния: в режиме лоатора, м в режиме рефлектометра, м	± 30 ± (1 + интервал дискретизации + $5 \cdot 10^{-5} \cdot L$)
Интервал дискретизации, м	1, 2, 4, 8
Установка показателя преломления	10 000...19 999
Критерии определения неоднородности: френелевское отражение, дБ затухание в неоднородности, дБ конец волокна, дБ	от -64 до -43 в зависимости от расстояния >2 >5
Время измерения	не более 3 мин
Время работы от встроенных аккумуляторов	не менее 3 ч
Тип оптического разъема*	FC, SC
Питание	4 аккумуляторные батареи AA/ ~220 В
Габариты, мм	226×108×35
Масса, кг	не более 1,0

* Могут устанавливаться другие типы разъемов.

5.4.4. Оптический рефлектометр малогабаритный типа СМА-4000

Оптический рефлектометр малогабаритный типа СМА-4000 разработан и производится фирмой NetTest, США.

Рефлектометр СМА-4000 содержит базовый блок со сменными оптическими модулями, отличающимися длиной волны источника оптического излучения, подмодуль источника оптического излучения, подмодуль измерителя мощности оптического излучения и подмодуль источника оптического излучения видимого диапазона.

Предназначен для измерения затухания оптических волокон, расстояния отражения от мест неоднородностей или обрывов, затухания отражения от мест неоднородностей, потерь в местах сращивания ОВ в процессе строительства и эксплуатации одномодовых и многомодовых

довых ВОЛП, а также для измерения мощности непрерывного оптического излучения и визуальной локализации повреждений ОВ.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 184—264 В и от аккумуляторных батарей.

Рабочий диапазон температур при питании:

- от сети переменного тока — от -15 до +50 °С;
- от аккумуляторных батарей — от 0 до +40 °С.

Хранение и транспортирование — при температуре от -25 до +60°С. Относительная влажность воздуха при питании:

- от сети переменного тока — до 70 %;
- от аккумуляторных батарей — до 95 %.

Габариты 229×381×89 мм. Масса 4,85 кг.

Характеристики базового блока и сменных модулей приведены в табл. 23; 24.

Таблица 23

Базовый блок малогабаритного рефлектометра СМА-4000

Дисплей	ЖКИ VGA (8,4-дюймовый цветной или 8,2-дюймовый черно-белый)
Хранение информации	Сохраняет до 125 рефлектограмм во внутренней памяти, до 65 000 на жестком диске или до 180 на гибком диске 1,44 Мбайт
Интерфейсы	Алфавитно-цифровая клавиатура, последовательный порт RS-232, параллельный порт, VGA, мышь, внешний порт клавиатуры
Язык	Стандартный английский + один из ряда, в т.ч. русский
Режим измерения затухания	Затухание отражения, затухание двухточечным методом, двухточечным с LSA, в дБ/км; потери в местах сращивания, коэффициент отражения
Установка показателя преломления	1,400000 — 1,699999
Режим сравнения рефлектограмм	Наложение до четырех рефлектограмм, совмещение, определение разности
Анализ	Автоматический высокоскоростной анализ волокна
Шаг установки вертикальной шкалы	0,125/0,25/0,5/1/2/4/8 дБ (в зависимости от модуля)
Шаг установки горизонтальной шкалы	0,0001...57,304 км/дел
Проведение измерений	В реальном масштабе времени, быстрое сканирование, среднее сканирование, медленное сканирование, с установленным временем усреднения (выбирается пользователем)
Вывод результатов	Отображение рефлектограммы на экране, таблица неоднородностей, комплексное отображение рефлектограмм с информационным окном, параметры измерения, ASCII отчет

Сменные оптические модули рефлектометра СМА-4000
(в зависимости от длины волны)

Параметр	Ед. изм.	4415	4425	4436	4439	4442	4453	4454	4456	4457	4473	4476	4498
Допуск по длине волны: 850 1300 1310 1410 1550 1625	нм					20 20			20 20 20	20 20 20			
		20	20	20	20		20	20 10	20	20	20 10	20 10	20
		20	20	20	20		20 10	20 10	20	20			
Ширина спектра при длине волны: 850 1300 1310 1410 1550 1625	нм					≤10 ≤10			≤10 ≤10 ≤10	≤10 ≤10 ≤10			
		≤10	≤10	≤10	≤10		≤12 ≤12 ≤12 ≤12	≤12 ≤12 ≤12 ≤12	≤10	≤10	≤10 ≤10	≤10 ≤10	≤10
		≤10	≤10	≤10	≤15				≤10	≤10			
Динамический диапазон (S/N=1) при длине волны: 850 1300 1310 1410 1550 1625	дБ					23 26			23 25 22	22 24 33			
		30	36	40	43		49	36 36	22	33			
		28	34	40	46		40 40	36 36	21	31	34 36	40 40	50
Мертвая зона при измерении положения неоднородности при длине волны, нм: 850 1300 1310 1410 1550 1625	м												
									3,5 3 3	4,5 4,5 4			
		3	3	3,5	3	3,5 3	3,5	3,5 3,5	3	3,5			
		3	3	3,5	3,5		3,5 3,5	3,5 3,5	3	3,5	4 4	4 4	4,5

Параметр	Ед. изм.	4415	4425	4436	4439	4442	4453	4454	4456	4457	4473	4476	4498
Мертвая зона при измерена затухания при длине волны, нм: 850 1300 1310 1410 1550 1625	м					6,5 7			6,5 7 7	8 9 11			
		10	10	6	10		7	7	7	11			
		10	12	6	10		7 7	7 7	10	12	11 7	11 7	12
Длительность импульса	нс мкс	10 20	10 20	10 20	10 30	4 1	10 20	10 20	4 10	10 20	10 20	10 20	10 30
Диапазоны по расстоянию	м	2—256				2— 24	2—256						
Разрешающая способность: по расстоянию по затуханию	м ДБ	0,1 0,001											
Линейность		0004											
Дискретизация в зависимости от диапазона	м	0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16											

5.5. Программное обеспечение Networks — Version 1.11

5.5.1. Назначение

Networks — мощное программное обеспечение для хранения и обработки рефлектограмм на персональном компьютере.

Networks — это модульный пакет эмуляционного программного обеспечения, поставляемого вместе с рефлектометром, который позволяет отображать, проводить анализ и составлять отчеты на персональном компьютере на основании сохраненных файлов рефлектограмм. Главная особенность программного обеспечения Networks состоит в том, что оно русифицировано, а также может использоваться для обработки не только рефлектограмм, но и результатов измерений оптического спектра. Для этого программа разделена на два независимых

приложения NetWorks/OTDR и NetWorks/OCA, запуск которых осуществляется из окна выбора при начальном пуске программы. Программа анализа рефлектограмм обеспечивает чтение всех форматов рефлектограмм компании NetTest, а также рефлектограмм в соответствии с рекомендацией Bellcore GR-196. Кроме того, обеспечивается импорт рефлектограмм в формате других производителей. По сравнению с измерением и анализом на рефлектометре анализ данных на компьютере обеспечивает более удобный пользовательский интерфейс, большую вычислительную мощность, большую разрешающую способность монитора, большие преимущества при составлении отчетов. Технические характеристики программы приведены в табл. 25.

Таблица 25

Технические характеристики программы Networks

Хранение информации	Сохраняет до 125 рефлектограмм во внутренней памяти, 1,44 МБ стандартный гибкий диск (записи хранятся в формате DOS), дополнительно жесткий диск
Количество анализируемых точек рефлектограмм	до 16 000
Настройка показателя преломления	1,400000—1,699999
Измерение потерь	Измерение возвратных потерь, двухточечное, двухточечное с LSA, дБ/км, дБ/км с LSA, потери на сварке, потери на отражение
Сравнение рефлектограмм	Наложение до 4 рефлектограмм, совмещение, дельта-сравнение
Проведение измерений	В реальном масштабе времени, быстрое сканирование, среднее сканирование, медленное сканирование, с установленным временем усреднения (выбирается пользователем)
Вывод результатов	Отображение рефлектограммы на экране, таблица неоднородностей, комплексное отображение рефлектограмм с информационным окном, параметры измерения, ASCII отчет
Анализ	Высокоскоростной комплексный анализ волокна
Настройка вертикальной шкалы	0,125/0,25/0,5/1/2/4/8 дБ (в зависимости от модуля)
Настройка горизонтальной шкалы	От 0,0001 км до 57,304 км на деление
Интерфейсы	Алфавитно-цифровая клавиатура, (2) RS-232 последовательных порта, (1) параллельный порт, VGA, мышь, внешний порт клавиатуры
Язык	Стандартный английский (другие — по заказу, в т.ч. русский)

5.5.2. Окно *Networks/OTDR*

После запуска программы *NetWorks/OTDR* отображается *начальное окно* в котором активны кнопки «Файл» и «Вид», предназначенные для открытия файлов трасс и задания параметров отображения, а также кнопка «Справка».

5.5.3. Начальные меню *Networks/OTDR*

После того, как файл трассы или файл списка трасс открыт, вид окна *NetWorks/OTDR* изменяется, включая в себя список трасс и области рефлектограмм (рис. 5.9). Некоторые элементы окна можно скрыть, отменив их выбор в меню «Вид».

По мере открытия трасс и списков трасс, а также выбора режимов и видов становятся доступными/недоступными различные меню и панели инструментов.

Недоступные параметры выделены серым цветом. Различные элементы окна программы *NetWorks/OTDR* в режиме отображения трассы описаны в следующих разделах.

Меню	Пункты меню	Функция
Файл	Создать	Отображает значок для создания нового списка трасс или шаблона заголовка
	Открыть	Открывает стандартное диалоговое окно Windows для открытия файлов следующих типов: Список трасс, Трасса, Измеритель мощности или Шаблон заголовка
	Предпочтения	Открывает диалоговое окно, позволяющее выбрать предпочтения параметров программы
	Выход	Закрывает все окна и выполняет выход из программы
Вид	Панель инструментов	Отображает/скрывает панель инструментов. Флажок указывает элемент, выбранный для отображения
	Строка состояния	Отображает/скрывает строку состояния. Флажок указывает элемент, выбранный для отображения
Справка	Содержание справки	Отображает справочную систему приложения
	О программе <i>NetWorks/OTDR</i>	Отображает сведения о программе, включая версию, серийный номер и регистрационную информацию

Рис. 5.9. Окно рефлектограммы *NetWorks/OTDR*

1. Строка заголовка. Отображает имя файла текущего списка трасс NetWorks/OTDR.

2. Строка меню. Отображает доступные меню. (Доступность меню зависит от выбранного режима).

3. Панели инструментов. Содержит кнопки для функций сохранения, печати, отображения, масштабирования, трассы и курсора.

4. Область списка трасс. Отображает трассы, содержащиеся в открытом списке трасс.

5. Заголовок рефлектограммы. Отображает информацию о курсоре, режиме потерь и потерях.

6. Рефлектограмма трассы. Отображает сетку, форму волны трассы, курсоры A/B , оси X и Y , а также информативные указатели мыши.

7. Регуляторы масштаба. Расширяет или сжимает вид рефлектограммы трассы по вертикали или по горизонтали.

8. Полосы прокрутки. Прокручивает рефлектограмму трассы по вертикали или по горизонтали.

9. Сноска рефлектограммы. Отображает ключевые параметры для первичной трассы.

10. Строка состояния. При перемещении в системе меню в левой части отображается выбранный пункт меню. В правой части содержатся данные считывания текущего расстояния и значение дБ для курсора мыши в рефлектограмме. Область рефлектограммы включает в себя заголовки и сноску рефлектограммы, рефлектограмму трассы, регуляторы масштаба и полосы прокрутки.

Оператор, работая с программой, получает широкие возможности по анализу и обработке рефлектограмм, обращаясь к следующим разделам:

- область списка трасс, заголовок рефлектограммы;
- рефлектограмма трассы, окно «Событие»;
- изменение предпочтений, задание параметров, отличных от умолчаний, отображение, работа с трассами, параметры;
- анализ, заголовки трассы;
- просмотр данных трассы в рефлектограмме трассы;
- режимы просмотра, загрузка вида из первичной трассы;
- сохранение вида в первичную трассу;
- изменение местоположения курсоров A и B ;
- масштабирование;
- отображение пакета, складывание, совмещение;
- зеркальное отражение, расчет в ручном режиме потерь;
- анализ трассы.

Глава 6. СИСТЕМА АДМИНИСТРИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

6.1. Методы мониторинга оптических систем передачи

Дистанционный контроль оптических волокон (ОВ) выполняется оптическим импульсным рефлектометром, диагностирующим состояние волокна по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов, что позволяет производить мониторинг как свободных, так и занятых волокон. В первом случае он выполняется для свободных резервных ОВ, по состоянию которых судят об исправности всего волоконно-оптического кабеля, а во втором — для ОВ, служащих для передачи трафика цифровых систем передачи. При таком тестировании используется рабочая длина волны рефлектометра, отличная от рабочей длины волны цифровой системы передачи (ЦСП), а в схему сети мониторинга вводится ряд пассивных оптических компонентов для мультиплексирования и разделения сигналов от ЦСП и рефлектометра.

Система администрирования волоконно-оптических линий связи Orion компании GN Nettest Fiber Optic Division является одной из наиболее передовых, обладающих перечисленными возможностями. Данная система установлена в таких телекоммуникационных компаниях мира, как National Fiber Network, ADC Telecommunications и AT&T Network Systems (США), Telsetra (Австралия), Telemig (Бразилия), Bezeq (Израиль), SANEF и SNCF (Франция), FTZ (Германия), Telia AB (Швеция) и ряда других.

Orion позволяет диагностировать нарушения ОК различными методами и отличается от аналогичных систем использованием в ней оптического рефлектометра с наивысшим разрешением и динамическими диапазонами, равными 46 дБ на длине волны 1550 нм и 41,5 дБ на длине волны 1625 нм. Специальные методы обнаруже-

ния нарушений позволяют проводить тест 20 ОВ длиной 150 км и больше менее чем за 12 мин, а благодаря расширенному диапазону (Extended Range — ER) режима контроля оптических волокон система Orion позволяет обнаружить нарушения кабелей на расстоянии до 300 км, что недостижимо при использовании любого существующего OTDR [27].

6.2. Параметры и технические характеристики автоматизированных систем администрирования волоконно-оптических кабелей

К основным параметрам автоматизированных систем администрирования ВОК можно отнести:

- адаптируемость к многочисленным конфигурациям сетей телекоммуникаций, сигнальным системам и требованиям организации контроля за ВОК;
- централизованное документирование и контроль сетевого кабельного хозяйства;
- привязку топологии сети к географической карте местности;
- ведение базы данных оптических компонентов, критериев тестирования и результатов контроля;
- тестирование по пассивному (свободному) и активному (занятому) волокнам;
- прогноз и минимизацию времени обнаружения неисправностей ВОЛС;
- широкий выбор средств связи с возможностью одновременного использования различных видов связи;
- возможность интегрирования системы в телекоммуникационную управляющую сеть TMN;
- защиту от несанкционированных пользователей;
- использование оптического рефлектометра с динамическим диапазоном, равным 45 дБ;
- работу в операционных средах Windows 95, Windows NT или UNIX;
- интуитивно ясный человеко-машинный интерфейс.

Система Orion предназначена для автоматического обнаружения, точной локализации и индикации на географической карте возникшей неисправности ВОЛС, позволяя минимизировать время устра-

нения нарушений оптических кабелей, немедленно направив ремонтную бригаду для проведения восстановительных работ [27].

Интенсивное развитие волоконно-оптических телекоммуникационных сетей и необходимость обеспечения их безотказной работы выдвигают на первый план задачу централизованного документирования и контроля сетевого кабельного хозяйства с возможностью прогнозирования и минимизации времени устранения неисправностей, возникающих в волоконно-оптических линиях связи. Наиболее эффективно данная задача может быть решена с помощью автоматизированной системы администрирования волоконно-оптических кабелей, представляющей собой систему удаленного контроля ОВ (Remote Fiber Test System — RFTS), программу привязки топологии сети к географической карте местности, а также базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля. При этом удаленный контроль оптических волокон выполняется с помощью оптических импульсных рефлектометров (Optical Time Domain Reflectometer — OTDR), осуществляющих диагностирование волокон по обратному рассеиванию световой волны, распространяющейся в пассивном или активном волокне оптического кабеля.

В первом случае производится контроль не предназначенного для передачи данных резервного оптического волокна, по результату которого судят об исправности всего кабеля, что не требует модификации действующих систем оптической связи. Во втором случае тестируется волокно, по которому производится передача данных. В связи с этим в линию связи вводится оптическое излучение с длиной волны, отличной от длины волны, используемой для передачи данных, а на приемной стороне производится разделение этих волн. Как известно, данный принцип может использоваться как для одного волокна, так и для всех волокон контролируемого кабеля и требует введения в систему оптической связи дополнительных компонентов.

В большинстве случаев система Orion обеспечивает установление места неисправности ВОК и генерирование сигнала тревоги в течение 5 мин при 10 с на одно волокно. В то же время специальные методы обнаружения нарушений позволяют тестировать 20 ОВ длиной 150 км и более меньше чем за 12 мин. При этом благодаря расширенному диапазону (Extended Range — ER) режима контроля оптических волокон RFTS позволяет обнаружить нарушения кабелей на расстоянии до 300 км, что невозможно при использовании любого другого из существующих OTDR.

В системе Orion предусмотрены следующие средства связи между TSC и любым из удаленных мест:

- по телефонной линии посредством модемов с V.24 протоколом;
- через сеть Ethernet с WAN/LAN посредством TCP/IP-протокола;
- прямая связь с удаленным оборудованием, используя последовательный порт с RS-232C протоколом;
- Ethernet/X.25 связь.

В системе Orion предусмотрена также возможность интегрирования системы в телекоммуникационную управляющую сеть TMN (Telecommunication Management Networks), определяемую стандартами и рекомендациями МСЭ-Т: М.3010, М.3100 X.700, X.711, X.721 и X.722. Использование TMN открывает широкий диапазон возможностей и учитывает развитие будущих потребностей интеграции, средств контроля и управления посредством различных интерфейсов. При этом полная интеграция системы Orion с сетью TMN обеспечивается использованием CMIP-протокола, который во многом определяет масштабируемость TMN-систем, хотя при необходимости возможно применение и SNMP-протокола, используя стандартный сценарий интегрирования систем контроля с TMN.

Чтобы установить связь с заданным пунктом и определить характеристики компонентов рассматриваемого участка сети, пользователь может либо описать необходимую точку сети, используя соответствующие идентификаторы в виде адреса, номера телефона и др., либо указать ее на географической карте.

Обобщая вышеизложенное, следует отметить, что RFTS обеспечивает автоматическое обнаружение, точную локализацию и индикацию на географической карте возникшей неисправности ВОЛС, позволяя немедленно направить ремонтную бригаду для проведения восстановительных работ и минимизировать время устранения нарушений оптических кабелей, к которым можно отнести:

- обрывы, обусловленные строительными работами, пожаром, автодорожными и железнодорожными авариями, стихийными бедствиями или саботажем;
- неисправности, вызванные выходом из строя компонентов ВОЛС, некачественными сварными соединениями, увеличением потерь из-за попадания влаги в кабель, нарушением коммутаций в сети и ряда других.

Технические характеристики основных узлов системы Orion приведены в табл. 26.

Технические характеристики основных узлов системы Orion

Наименование	Параметры
ОТАУ	
Количество каналов	4, 8, 12, 24 и 96
Тип разъемов	FC/PC, VFO, EC, DIN, SC/APC и др.
Вносимые потери без коннекторов, дБ	<1,2
Потери на 1625 нм, дБ	<0,3
Переходные помехи, дБ	-80
Возвратные потери, дБ	>55
Повторяемость, дБ	+0,005
Время подключения, мс	<12
Количество циклов	10000000
WDM	
Развязка при односторонней передаче на длине волны 1625 нм	>50 дБ
Вносимые потери на длине волны 1625 нм, дБ	<0,5
Вносимые потери на длине волны 1600 нм, дБ	<0,5
ФИЛЬТРЫ	
Вносимые потери LPF-фильтра на длине волны 1625 нм, дБ	<1,3
Изоляция LPF-фильтра, <1600 нм, дБ	>35
Вносимые потери SPF-фильтра на длине волны 1600 нм, дБ	<1,8
Изоляция SPF-фильтра, >1600 нм, дБ	>15

6.3. Структурная схема системы автоматизированного мониторинга ВОК

Основу архитектуры данной системы составляют (рис. 6.1):

- устройство управления системой мониторинга (Test System Controller) — TSC;
- устройства удаленного тестирования оптических волокон — RTU StarProbe;
- устройства доступа тестирования оптических волокон — ОТАУ StarPath.

TSC представляет собой персональный компьютер (ПК) с операционной системой Windows или UNIX и прикладным программным обеспечением администрирования кабельной сети StarGuide, имеющим интуитивно ясный человеко-машинный интерфейс. TSC может выполняться в следующих конфигурациях:

- ПК под Windows 95 или Windows NT для одного пользователя;

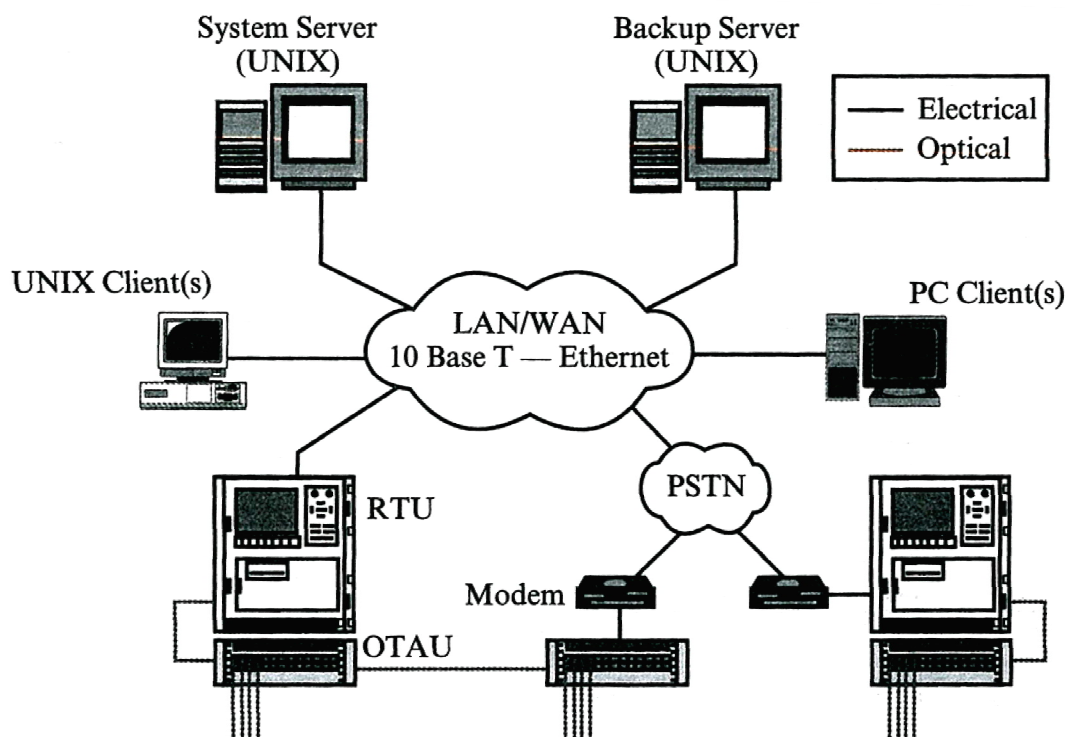


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема системы автоматизированного мониторинга-ВОК:

(RTU — Remote Test Unit) — удаленный модуль тестирования оптических волокон; (OTAU — Optical Test Access Unit) — модуль доступа/коммутации тестирования оптических волокон или оптический коммутатор; (TSC — Test System Control) — устройство управления системой мониторинга ВОК на базе UNIX сервера или персонального компьютера, соответствующего программного обеспечения

- сетевой компьютер под Windows NT или Novell для рабочей группы, обеспечивающий многопользовательский доступ с поддержкой до шести одновременно работающих пользователей;
- ПК под Windows NT или рабочая станция SunSparc под UNIX для предприятия, поддерживающая конкурентный доступ множеству клиентов, используя протокол TCP/IP для удаленного доступа через сети общего пользования с ПК, который имеет клиентское программное обеспечение.

StarProbe содержит один или несколько модулей удаленного контроля оптических волокон (Remote Test Unit — RTU), выполненных на основе последней технологической разработки GN Nettek — оптического импульсного рефлектометра TD-3000, отличающегося наивысшим разрешением и динамическим диапазоном.

StarProbe имеет опцию в виде модуля локального доступа (Local Access Module — LAM), который обеспечивает возможность управления RTU с клавиатуры OTDR и отображением информации на его экране. В связи с этим любые функциональные возможности, доступные для OTDR, имеются и в LAM. Это, естественно, обеспечивает легкий в использовании интерфейс и минимизирует оборудование. Другим средством входа в систему является опция сопровождения удаленного доступа (Remote Maintenance Access — RMA), которая обеспечивает дистанционный доступ к системе из любой точки сети.

RTU StarProbe выполнен на основе последней технологической разработки GN Nettest — оптического рефлектометра TD-3000, отличающегося наивысшим разрешением и динамическим диапазоном. В состав RTU введен компьютер, обеспечивающий хранение базы данных по измеренным рефлектограммам.

StarPath выполнен в виде оптических переключателей — модулей доступа для контроля оптических волокон (Optical Test Acces Unit — ОТАУ), позволяющих сформировать необходимое число портов подключения волокон к RTU. Данные модули могут быть сконфигурированы в почти бесконечном наборе комбинаций, в связи с чем они позволяют обеспечить наиболее эффективное покрытие кабельной сети. Помещая ОТАУ в узлах дерева сети, один RTU может обеспечить мониторинг более 5000 кабелей, что в зависимости от структуры сети позволяет значительно снизить стоимость всей испытательной системы. Управление и конфигурирование ОТАУ может осуществляться дистанционно от RTU, а связь между StarProbe, RTU и ОТАУ обеспечивается в соответствии со стандартом Bellcore по TL-1 протоколу, что позволяет использовать ОТАУ других производителей.

ОТАУ StarPath представляет собой оптический переключатель — модуль доступа для контроля оптических волокон, позволяющий сформировать необходимое число портов подключения волокон к RTU. Данные модули могут быть сконфигурированы в почти бесконечном наборе комбинаций, в связи с чем они позволяют обеспечить наиболее эффективное и легко расширяемое покрытие кабельной сети. Помещая ОТАУ в узлах дерева сети, один RTU может обеспечить мониторинг до 500 волокон, что в зависимости от структуры сети позволяет значительно снизить стоимость всей системы. Управление и конфигурирование ОТАУ может осуществляться дистанционно от RTU, а связь между RTU и ОТАУ обеспечивается в соответствии со стандартом Bellcore по TL-1 протоколу, что позволяет использовать ОТАУ других производителей.

Есть возможность управления по коммутируемой телефонной линии. Модуль ОТАУ также монтируется в стандартную 19" или 23" стойку.

Ремонтная бригада в состоянии проконтролировать качество устранения повреждения ВОК при помощи LAM. Другим средством входа в систему является опция сопровождения удаленного доступа (Remote Maintenance Access — RMA), которая обеспечивает дистанционный доступ к системе из любой точки сети. Модуль RTU монтируется в стандартную 19" или 23" стойку и может закрываться на ключ для предотвращения несанкционированного доступа к нему [26].

Имеется в наличии широкая номенклатура оптических модулей с различными техническими параметрами для удовлетворения различных потребностей заказчиков.

6.4. Взаимодействие элементов автоматизированного мониторинга ВОК

В системе Orion предусмотрены следующие средства связи между TSC и любым из удаленных мест:

- по телефонной линии посредством модемов с V.24-протоколом;
- через сеть Ethernet с WAN/LAN посредством TCP/IP-протокола;
- прямая связь с удаленным оборудованием, используя последовательный порт с RS-232C-протоколом;
- Ethernet/X.25 связь.

Широкий выбор средств связи в системе Orion обеспечивает большую гибкость технических решений при одновременном использовании различных видов связи в разных областях контролируемой сети и при последующем ее обновлении и развитии.

Ввиду того, что система Orion является модульной системой, она легко адаптируется к многочисленным конфигурациям сети, сетям телекоммуникаций, сигнальным системам и требованиям организации контроля волоконно-оптических кабелей. Система Orion способна охватить сеть площадью 300 000 км² и позволяет автоматически контролировать ее на протяжении многих лет в течение 24 ч в сутки [26].

6.5. Методы диагностики оптических волокон

Как было отмечено выше, контроль ОК по пассивным ОВ основан на тестировании резервного волокна ОК при длине волны, равной рабочему диапазону оптического сигнала, независимо от длины волны тестирующего оптического излучения.

При этом по состоянию контролируемого резервного оптического волокна судят об исправности всего кабеля, и, по некоторым данным, этот способ мониторинга ВОК обеспечивает выявление около 90 % нарушений кабеля. Однако для своевременного и гарантированного обнаружения отклонений параметров контролируемых ВОК оптимальным считается контроль, как минимум, двух волокон в кабеле.

В последнее время из-за быстрого роста объемов передаваемой информации все большее распространение получает другой способ мониторинга — по активным волокнам. Как известно, для передачи данных в ВОЛС обычно применяются 1310 или 1550 нм длины волн оптического излучения. Следовательно, для контроля состояния волокон было бы целесообразно использовать $\lambda = 1550$ нм при длине волны $\lambda = 1310$ нм, или $\lambda = 1310$ нм при передаче на длине волны $\lambda = 1550$ нм. В то же время по экономическим соображениям, вызванным необходимостью увеличения емкости каналов передачи данных, часто используются обе указанные длины волн, поэтому в последнем случае для контроля необходимо использовать иную длину волны, например, $\lambda = 1625$ нм, которая отличается от используемых для передачи данных и, как следствие, может быть эффективно выделена на приемной стороне линии связи.

С этой целью на передающей стороне ВОЛС вводятся WDM — оптический мультиплексор с разделением по длинам волн, объединяющий длину волны тестирующего излучения с длиной волны передачи трафика от сетевого оборудования, а для исключения взаимного влияния процессов передачи данных и контроля ОБ в схему мониторинга вводятся фильтры LPF и SPF. Последние предотвращают попадание тестирующего излучения на вход приемного оборудования аппаратуры передачи данных (МВБ — мультиплексор ввода-вывода), а излучение информационного сигнала — на OTDR [26].

Дальнейшее развитие метода контроля оптических кабелей по активным ОБ основано на использовании большего количества длин волн оптического излучения, распространяющегося по волокну, и, как следствие, предусматривает применение мультиплексоров по длине волны — WDM. При таком решении одна длина волны может использоваться для тестирования волокна, а остальные — для передачи данных.

По сравнению с рассмотренным выше методом контроля оптических кабелей по пассивному волокну метод контроля по активно-

му волокну дает практически 100% гарантии обнаружения неисправностей кабеля и отличается более высокой стоимостью реализации из-за введения в линию связи оптических мультиплексоров и фильтров. Применение этого метода оказывается целесообразным для тестирования ОВ, по которым передается важная информация, а также когда для передачи данных задействованы все волокна в кабеле.

6.6. Функционирование системы автоматизированного мониторинга ВОК

Ввиду того, что работа системы автоматического администрирования основана на рефлектометрических измерениях контролируемых волокон, работа с ней фактически является работой с OTDR в режиме дистанционного управления и поэтому не требуется глубоких знаний работы на компьютере. Прикладное программное обеспечение StarGuide позволяет производить измерения, обрабатывать и анализировать их, имея в своем распоряжении широкие возможности выделения и идентификации отклонений текущей рефлектограммы относительно эталонной.

В распоряжении пользователя имеются различные функции измерений:

- измерения потерь, отражений и расстояния до этих событий;
- измерение ORL;
- автоматическое измерение с обнаружением оптических событий, параметры которых превышают установленные пороги их обнаружения; полуавтоматическое измерение с маркерами; ручное измерение с курсорами;
- локализация случаев нарушения соединений, отражений и обнаружение конца волокна.

При этом результаты измерений могут быть представлены как в графической, так и в табличной форме.

Система Orion позволяет производить трассировку ВОЛС по географической карте и визуализацию местоположения нарушения, обеспечивая соответствие расстояний между маркерами, установленными на географической карте, и расстоянием, измеренным оптическим способом, что существенно улучшает точность локализации нарушений. Кроме того, имеется возможность задавать масштаб изображений и вид представления, визуализировать состояния тре-

воги, создавать новые связи, наносить на карту различные объекты и т.д., повышая точность привязки трассы ВОК к местности.

При работе с системой в соответствии с установившейся практикой испытаний и индивидуально для каждого контролируемого волокна задаются:

- условия выполнения:
 - немедленно по запросу, периодически или по заданному расписанию;
 - когда происходит тревога (при подключении оборудования сигнализации ЦСП к сухим контактам реле RTU);
- пороги обнаружения нарушений при сравнении первичной и эталонной рефлектограмм;
- критерии сравнения первичной и эталонной рефлектограмм;
- параметры тестирования оптических волокон:
 - диапазон / разрешение;
 - длина волны;
 - длительность импульса;
 - коэффициент преломления волокна;
 - количество усреднений в зависимости от типа тестирования.

В процессе мониторинга оптического кабеля автоматически выполняются:

- снятие рефлектограммы и ее сравнение с эталонной по заданным критериям и порогам обнаружения повреждений;
- обнаружение отклонения параметров полученной рефлектограммы;
- установление связи с TSC и передача данных о тестировании и результатах его анализа;
- на TSC анализируются полученные данные, локализуется место повреждения, выводятся визуальное и звуковое сообщения об аварии с указанием даты, времени, вида повреждения, информации о месте неисправности. Также происходит отображение аварии на географической карте местности. Есть возможность просмотра аварийной рефлектограммы для получения более детальной информации об аварии.

При прогнозирующем обслуживании, направленном на прогнозирование ситуаций, выполняется регулярное автоматическое накопление в базе данных характеристик и результатов измерений ОВ (ослабления, потерь, рефлектограмм и др.), что в свою очередь позволяет:

- идентифицировать и устранять нарушения прежде, чем возникнет авария, приводящая к перерыву в связи;
- контролировать качество оптических кабелей во времени;
- проводить вычисления по нескольким индикаторам качества;
- устанавливать статус сети.

Чтобы гарантировать непрерывность обслуживания, система Orion обеспечивает функцию импорта рефлектограмм OTDR предыдущих версий, а также других файлов формата Bellcore [26].

Каждая из рассмотренных процедур имеет свой уровень приоритета, который при необходимости может быть изменен. Изначально наивысший приоритет устанавливается для процедуры ввода и изменения базы данных об оборудовании системы, тестируемых волокнах, параметрах их тестирования, порогах обнаружения повреждений. Кроме того, администратор системы может устанавливать приоритеты для каждого пользователя и определять группы санкционированных пользователей. Для некоторых групп приоритеты являются общими и наследуются подгруппами, а с целью фиксации попыток связи система организует соответствующий файл. Пользователь с более низким уровнем приоритета имеет возможность проводить тестирование по требованию, а также просматривать результаты измерений. Разграничение полномочий пользователей позволяет предупредить несанкционированное изменение конфигурации системы, параметров тестирования ОВ и других данных.

6.7. Выводы об использовании системы автоматического администрирования

Использование автоматизированной системы администрирования ВОК позволяет обеспечить автоматическое обнаружение, точную локализацию и индикацию на географической карте возникшей неисправности ВОЛС, позволяя немедленно направить ремонтную бригаду для проведения восстановительных работ и минимизировать время устранения нарушений оптических кабелей, к которым можно отнести:

- обрывы кабеля, обусловленные строительными работами, пожаром, автодорожными и железнодорожными авариями, стихийными бедствиями или саботажем;

- неисправности, вызванные выходом из строя компонентов ВОЛС, некачественными сварными соединениями, увеличением потерь из-за попадания влаги в кабель, нарушением коммутаций в сети и др.

Внедрение системы автоматического мониторинга неразрывно связано с созданием базы данных кабельного хозяйства волоконно-оптической сети. Ввиду ее централизованности, гибкой наращиваемости и конфигурируемости это способствует повышению степени оперативности управления сложными и разветвленными ВОЛС, упрощению задач документирования новых прокладываемых кабелей и изменения статуса уже существующих.

Компоненты системы имеют модульную конструкцию с широким спектром различных конфигураций и наборов интерфейсов, поэтому система мониторинга легко внедряется в любую телекоммуникационную сеть, наращивается и подстраивается под ее текущие изменения.

С растущей конкуренцией в телекоммуникационной индустрии все более явной становится проблема постоянного поддержания высокого качества предоставляемых услуг. Система Orion позволяет оптимизировать среднее время восстановления ВОЛС при отказе и способна идентифицировать неисправности ВОК до того, как они повлияют на качество связи. Таким образом, она обеспечивает высокий уровень сервисного обслуживания волоконно-оптической сети связи, сохраняя инвестиционную привлекательность и способствуя повышению качества обслуживания конечных пользователей.

Система Orion обеспечивает эффективное использование человеческих ресурсов. При возникновении неисправности система обнаруживает и локализует ее. Восстановительная бригада отправляется непосредственно к месту повреждения, обладая подробной информацией об аварии, поэтому время восстановления значительно сокращается и человеческие ресурсы могут распределяться более эффективно, сокращая стоимость поддержания работоспособности и надежности системы связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время ВОСП развиваются особенно быстро. Для них разработаны и внедряются новые пассивные и активные компоненты, параметры которых будет необходимо в ближайшем будущем измерять в процессе строительства и эксплуатации. Обзор методов и приборов, предназначенных для этого, выходит за рамки данного пособия. Однако в их основе лежат рассмотренные выше измерения, осуществляемые в проходящем и рассеянном свете.

Список принятых сокращений

ВОК — волоконно-оптический кабель

ВОЛП — волоконно-оптическая линия передачи

ВОСП — волоконно-оптическая система передачи

ОВ — оптическое волокно

ОК — оптический кабель

ЦСП — цифровая система передачи

DGD (Differential Group Delay) — дифференциальная групповая задержка

DCF (Dispersion Compensating Fiber) — компенсирующее дисперсию волокно

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — сверхплотное волновое мультиплексирование по длине волны

FBG (Fiber Bragg Grating) — волоконная брэгговская решетка — оптический элемент, основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевины или оболочки оптического волокна

PMD (Polarization Mode) — поляризационная модовая дисперсия

PSP (Principal State of Polarization) — состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) — синхронная цифровая иерархия

SOP (State of Polarization) — ортогонально поляризованные составляющие электрического поля или состояния поляризации

STM-4 (Synchronous Transport Module) — синхронный транспортный модуль уровня 4, соответствующий скорости передачи информации 622,08 Мбит/с

STM-64 (Synchronous Transport Module) — синхронный транспортный модуль уровня 64, соответствующий скорости передачи информации 9953,28 Мбит/с

TDM (Time Division Multiplexing) — временное мультиплексирование информационных потоков

Рекомендуемая литература

1. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. — М., 1997.
2. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Пискунов В.В. Современные методы и приборы для измерения параметров волоконно-оптических линий связи: Учеб. пособие Мин-ва энергетики РФ. — СПб., 2001. — 49 с.
3. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Сайрус Системе, 1999.
4. Agrawal G.P. Fiber-optic communication systems: 2nd ed. — John Wiley&Sons Inc., 1997.
5. Агравал Т.П. Нелинейная волоконная оптика. — М.: Мир, 1996.
6. Зельдович Б.Я., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта: Сер. В мире науки, 1992.
7. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. — Вэлком, 2002.
8. Комаров М.Ю. Контрольно-измерительное оборудование для монтажа и эксплуатации волоконно-оптических линий связи // Метрология, № 1. — 1998.
9. Мурадян А.Г., Гольдфарб И.С., Иноземцев В.П. Оптические кабели многоканальных линий связи. — М.: Радио и связь, 1987.
10. Руководящий технический материал по применению систем и аппаратуры синхронной цифровой иерархии на сети связи Российской Федерации. Первая редакция. — М.: ЦНИИС, 1994.
11. Шевцов Э.А., Белкин М.Е. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи. — М.: Радио и связь, 1992.
12. ГОСТ Р 52266-2004. «Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия». — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
13. Рекомендации МСЭ-Т.
14. ГОСТ 26814-86 «Кабели оптические. Методы измерения параметров». — М.: Госстандарт СССР, 1986.
15. Андрушко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи: Учеб. пособие для ВУЗов. — М.: Радио и связь, 1985.

16. *Шикетанц Д.* Теория измерений по методу обратного рассеяния в световодах // Зарубежная электроника, № 6. — 1984. — С. 87—94.
17. *Убайдулаев Р.Р.* Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 1998. — 267 с, ил.
18. *Воронцов А.С., Гурт О.И., Мифтяхетдинов С.Х.* и др. Оптические кабели связи российского производства: Справочник. — М.: Эко-Трендз, 2003.
19. *Ракк М.А.* Измерения в цифровых системах передачи. — М.: Маршрут, 2004.
20. *Марьенков А.А.* и др. Измерение хроматической дисперсии в проложенных оптических кабелях. — ЗАО «Институт информационных технологий». <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/>
21. *Марьенков А.А., Бобров В.И., Лузгин А.Н.* Использование стробоскопического преобразования при исследовании многомодовых оптических волокон. — «Институт информационных технологий», <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/>
22. *Анисимов Н.Н., Гринштейн М.Л., Марьенков А.А.* Метрологическое обеспечение оптических рефлектометров. — «Институт информационных технологий», <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/>
23. *Авдеев Б.В.* и др. Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле. — <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/>
24. *Митрохин В.Е.* Конструкции, измерение характеристик и методика проектирования оптических магистральных линий связи железнодорожного транспорта: Учеб. пособие / Омская гос. академия путей сообщения. — Омск, 1997.
25. *Митрохин В.Е.* Изучение принципа действия и программного обеспечения рефлектометра. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Специальные измерения и техническая диагностика» / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2004.
26. *Митрохин В.Е.* Устройство, технические характеристики и поверка оптического рефлектометра. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Специальные измерения и техническая диагностика» / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2004.

27. *Митрохин В.Е.* Измеритель средней мощности оптического излучения «Алмаз-21». Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Специальные измерения и техническая диагностика» / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2004.

Интернет

1. [http: //kunegin.narod.ru](http://kunegin.narod.ru)
2. [http: //optictelecom.ru](http://optictelecom.ru)
3. [http: //www. ruscable.ru](http://www.ruscable.ru)
4. [http: //www.syrus.ru](http://www.syrus.ru)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основные сведения о ВОЛП.....	6
1.1. Волоконно-оптические кабели. Условия эксплуатации оптического волокна и кабеля	8
1.2. Оптическое волокно. Общие положения.....	14
1.3. Распространение световых лучей в оптических волокнах	15
1.4. Моды, распространяющиеся в оптических волноводах	16
1.5. Одномодовые оптические волокна	19
1.6. Константа распространения и фазовая скорость	21
Глава 2. Процессы, происходящие в оптическом волокне, и их влияние на скорость и дальность передачи информации	26
2.1. Затухание в оптическом волокне	26
2.2. Дисперсия	28
2.3. Распространение световых импульсов в среде с дисперсией	33
2.4. Поляризационная модовая дисперсия	52
2.5. Контроль PMD в процессе эксплуатации ВОСП	62
2.6. Выводы	63
Глава 3. Методы измерения механического натяжения удлинения	65
3.1. Влияние продольных деформаций (натяжения) на работу систем связи.....	65
3.2. Контроль надежности оптических кабелей. Бриллюэновский сигнал.....	66
3.3. Возможности бриллюэновского рефлектометра.....	68
3.4. Измерения натяжения с помощью бриллюэновского рефлектометра	69
3.5. Применение бриллюэновской рефлектометрии.....	72
Глава 4. Классификация измерений в ВОЛП	74
4.1. Основные параметры линейных оптических трактов волоконно- оптических систем передачи ВОСП	75
4.2. Характеристики цифровых ВОСП плезиохронной иерархии	79
4.3. Характеристики цифровых ВОСП синхронной иерархии	80
4.4. Параметры оптических волокон, используемых в ВОСП	84
4.5. Измерения излучения, проходящего через линейный тракт	92
4.6. Измерения излучения, рассеянного в линейном тракте	114

4.7. Измерение расстояния неоднородности в ОВ.....	119
4.8. Измерение затухания и потерь оптической мощности в неоднородностях ОВ	119
Глава 5. Измерение оптической мощности, затухания и вносимых потерь.....	130
5.1. Измеритель средней мощности оптического излучения «Алмаз-21».....	130
5.2. Технические характеристики и устройство рефлектометра.....	139
5.3. Изучение принципа действия и программного обеспечения рефлектометра	147
5.4. Методика поверки оптического рефлектометра	162
5.5. Программное обеспечение Networks — Version 1.11	173
Глава 6. Система администрирования волоконно-оптических кабелей.....	177
6.1. Методы мониторинга оптических систем передачи.....	177
6.2. Параметры и технические характеристики автоматизированных систем администрирования волоконно-оптических кабелей.....	178
6.3. Структурная схема системы автоматизированного мониторинга ВОК	181
6.4. Взаимодействие элементов автоматизированного мониторинга ВОК	184
6.5. Методы диагностики оптических волокон.....	184
6.6. Функционирование системы автоматизированного мониторинга ВОК	186
6.7. Выводы об использовании системы автоматического администрирования.....	188
Заключение	190
Список принятых сокращений.....	191
Рекомендуемая литература	192

Учебное издание

Митрохин Валерий Евгеньевич

ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

*Учебное пособие
для вузов
железнодорожного транспорта*

Редактор *В.А. Русев*
Корректоры *Н.В. Черножукова, А.В. Лужкова*
Компьютерная верстка *А.Н. Рудякова*

Подписано в печать 20.12.2007 г.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Печ. л. 12.5. Тираж 2000 экз. Заказ № 151
ГОО «Учебно-методический центр по образованию
на железнодорожном транспорте»
107078, Москва, Басманный пер., д. 6
Тел.: +7 (495) 262-12-47
e-mail: marketing@umczdt.ru
[http: //www.umczdt. ru](http://www.umczdt.ru)

Отпечатано в ОАО «Московская типография №6»
115088, Москва, Южнопортовая ул., 24