



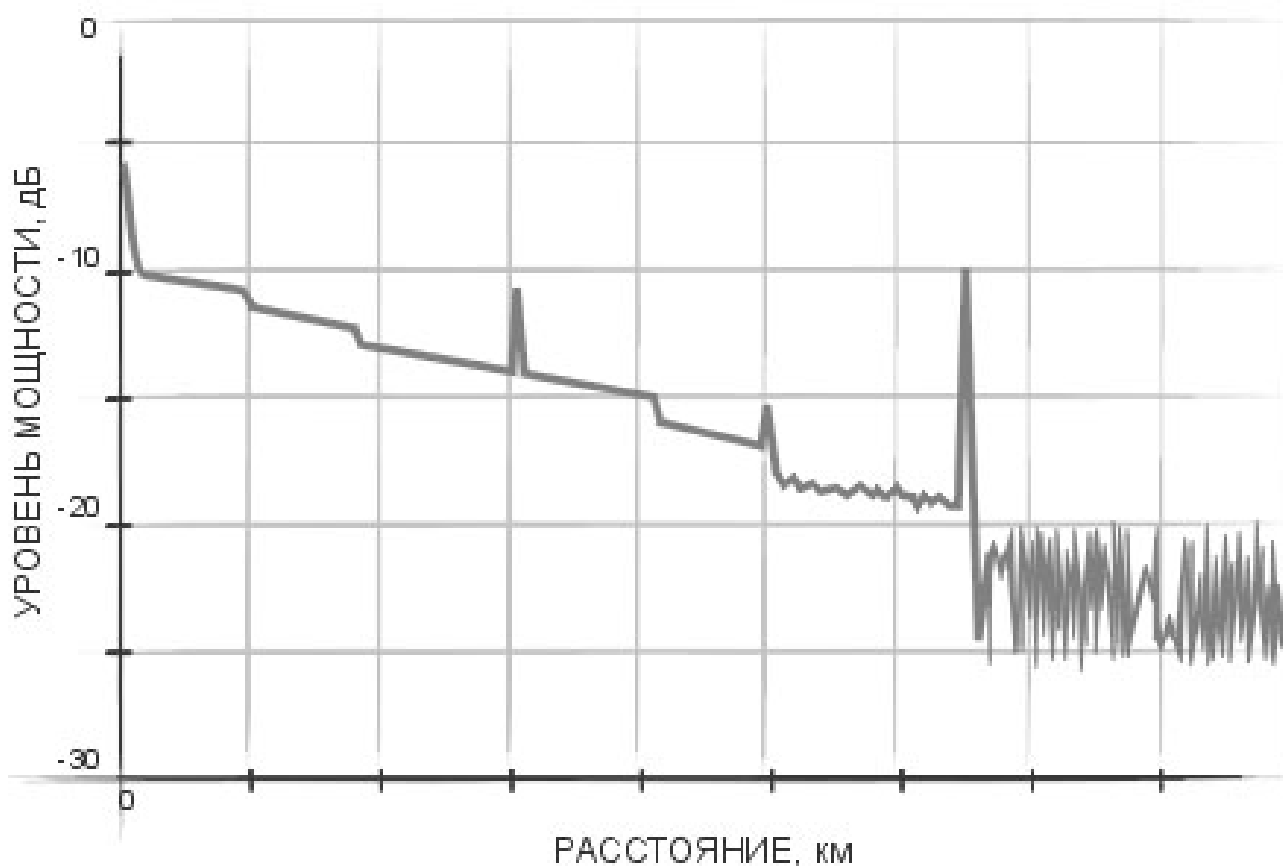
# МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им М.В. Ломоносова

Кафедра оптики и спектроскопии физического факультета  
Отдел физических проблем квантовой электроники научно-исследовательского института  
ядерной физики им. Д. В. Скобельцына

В.Г. Воронин, О.Е. Наний, А.А. Кулик, А.Н. Туркин

## ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР



Москва 2007

## **Правила Техники Безопасности**

- 1) Запрещается снимать защитный колпачок со световода и подносить к глазам открытый свободный конец световода.
- 2) При любых неполадках в работе установки обращаться к дежурному преподавателю

## **Введение**

Импульсные оптические рефлектометры (OTDR-Optical Time Domain Reflectometr) различных типов широко используются практически на всех этапах создания волоконно-оптических систем связи: от производства волокна и оптического кабеля до строительства волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и их эксплуатации. Оптический рефлектометр предоставляет возможность быстрой и удобной диагностики состояния волокон, кабелей и волоконно-оптических линий связи в целом. В частности, рефлектометр позволяет:

- Определять распределение потерь вдоль ВОЛС, выявлять дефектные участки или элементы линии связи.
- Определять точное расположение обрывов или дефектных участков ВОЛС.
- Оценивать полные потери в волоконно-оптической линии связи при приемке линии и периодическом тестировании.
- Измерять средние потери оптического волокна на катушках, равномерность распределения потерь в волокне и выявлять наличие локальных дефектов при производстве волокна.
- Измерять потери в механических и в сварных соединениях
- Измерять коэффициент отражения и коэффициент помех для встречного направления.
- Обнаруживать постепенное или внезапное ухудшение качества волокна путем сравнения его характеристики с результатами более ранних измерений.

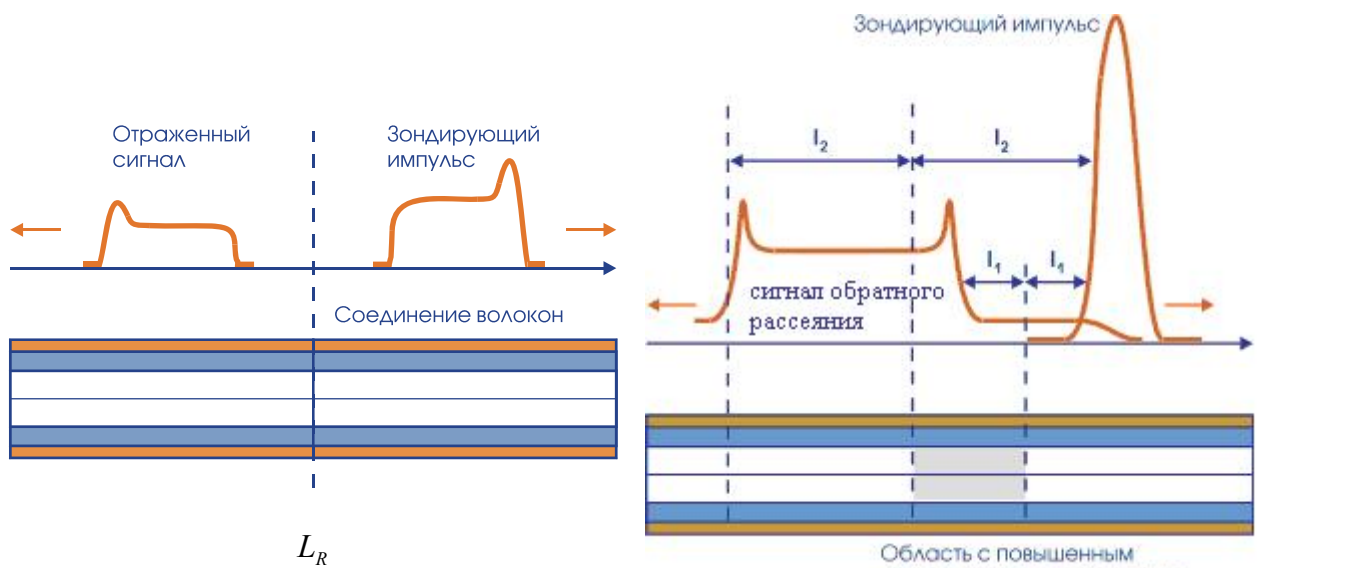
Рефлектометр стал одним из самых распространенных приборов для диагностики ВОЛС, поскольку предоставляет возможность оперативной неразрушающей диагностики инсталлированной линии связи с использованием доступа только к одному концу волокна. При этом рефлектограмма линии связи является обязательным элементом документации на ВОЛС при ее сдаче в эксплуатацию.

## **Принцип работы импульсного оптического рефлектометра**

Принцип работы импульсного оптического рефлектометра основан на измерении мощности светового излучения, рассеянного или отраженного различными участками волоконно-оптической линии связи при распространении вдоль нее короткого зондирующего светового импульса. Поскольку фотоприемник рефлектометра расположен вблизи того же конца волокна, через который вводится зондирующий световой импульс, то регистрируется только та часть рассеянного (отраженного) излучения, которая «канализируется» волокном и распространяется вдоль него в сердцевине. Анализ временной зависимости рассеянного излучения, попадающего на фотоприемник рефлектометра, позволяет рассчитать целый ряд характеристик волокна и волоконно-оптической линии связи. Если коэффициент рассеяния света в некоторой области волокна известен, то рефлектометр позволяет определить мощность зондирующего сигнала в этой области. Если коэффициент обратного рассеяния не известен, но одинаков в

определенных участках ВОЛС, то рефлектометр позволяет определить отношение мощностей сигнала на этих участках и, таким образом, затухание между этими участками.

Основное различие между явлениями отражения и рассеяния света назад в оптическом волокне заключается в том, что отражение – локальное явление, а рассеяние – распределенное. В волокне отражение обычно возникает в местах соединения волокон разного типа, при наличии изломов, трещин и других, крупных по сравнению с длиной световой волны, но малых по сравнению с длительностью светового импульса неоднородностей показателя преломления. Рассеяние происходит на мелких неоднородностях, которые хаотически, но примерно равномерно распределены вдоль всего волокна. Формирование отраженного и рассеянного излучения в оптическом волокне иллюстрирует рис.1.



а). Световой сигнал, отраженный от неоднородности в точке  $L_R$ : форма отраженного сигнала совпадает с формой зондирующего импульса.

б). Сигнал обратного рассеяния от участка волокна с большим коэффициентом рассеяния: длительность сигнала обратного рассеяния равна времени двойного прохода света по этому участку.

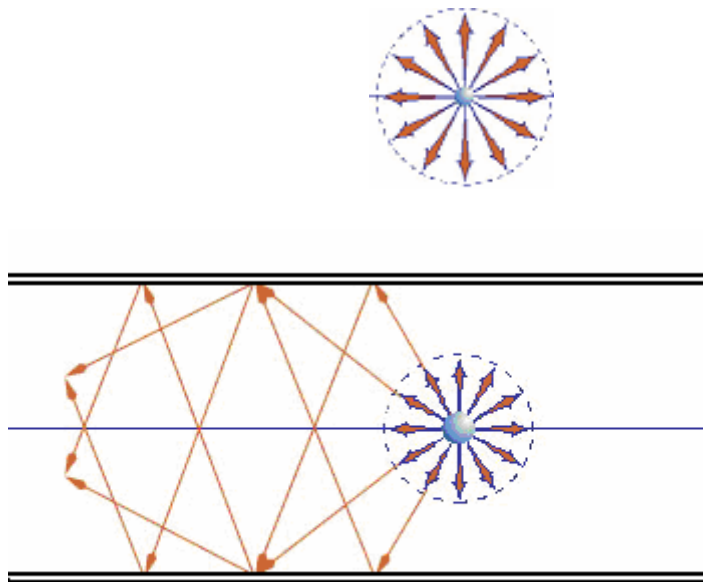
Рис.1. Формирование отраженного и рассеянного излучения при распространении короткого светового импульса (зондирующего сигнала) в оптическом волокне.

Поскольку отражение происходит от конкретной области волокна с некоторой координатой  $L_R$ , то формируется отраженный световой сигнал, форма которого совпадает с формой зондирующего сигнала (рис.1а.).

В окнах прозрачности современных одномодовых ОВ, т.е. в спектральных областях вблизи длин волн 1300 нм и 1550 нм, основной причиной затухания света является рассеяние света на неоднородностях малого размера (неоднородности считаются малыми, если их диаметр  $d_N \ll \lambda_n$ ,  $\lambda_n$ -длина волны света в волокне), возникшими в силу термодинамических флуктуаций плотности в расплавленном кварце и зафиксированными в нем в процессе затвердевания при вытягивании волокна. Такие неоднородности волокна называются «вмороженными» неоднородностями. Закономерности рассеяния на «вмороженных» неоднородностях очень хорошо совпадают с закономерностями рэлеевского рассеяния, полученными теоретически для рассеяния на сферических неоднородностях малого диаметра. Поэтому такой вид рассеяния света в волокне (когда  $d_N \ll \lambda_n$ ) называется рэлеевским рассеянием света.

$$\text{Величина рэлеевского рассеяния} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

**Рэлеевское рассеяние** характеризуется сферической симметрией рассеянного излучения (см. рис.2.а), поэтому в однородной среде интенсивность излучения быстро уменьшается из-за расходимости излучения. В оптическом волокне часть рассеянного излучения канализируется сердцевинной и распространяется вдоль волокна с малым затуханием не испытывая дифракционной расходимости (см. рис.2.б) в направлении входного торца ОВ. Именно эта часть рассеянного излучения попадает на фотоприемник, регистрируется и служит источником информации об оптическом волокне.



а)  
Рэлеевское рассеяние в однородной среде. Мощность излучения быстро падает с расстоянием из-за расходимости.

б)  
Рэлеевское рассеяние в ОВ (вид сбоку). Часть излучения, попадающая в числовую апертуру, распространяется назад вдоль волокна без расходимости.

Рис.2 Рэлеевское рассеяние света в однородной среде (а) и в оптическом волокне (б).

Поскольку рассеивающие центры распределены в среднем равномерно вдоль волокна, то рассеянное разными центрами излучение возвращается к входному торцу волокна в разное время (с разной задержкой) и, поэтому, даже короткий зондирующий импульс формирует непрерывный убывающий по мощности сигнал обратного рассеяния. Зависимость мощности сигнала обратного рассеяния, поступающей на фотоприемник, измеряемая в дБ, от времени приведена на рис.3.а и соответствующая зависимость затухания в дБ от расстояния на рисунке 3.б.

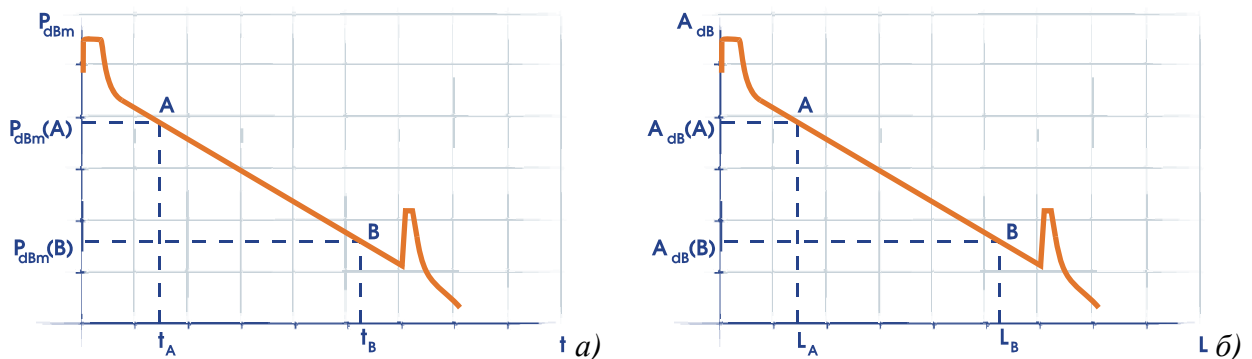


Рис.3. Временная зависимость регистрируемой фотоприемником мощности обратного рассеяния (а) и соответствующая этой временной зависимости рефлектограмма (б), полученная переходом к новой горизонтальной и вертикальной шкалам по формулам (4,5).

Мощность сигнала обратного рассеяния в однородном ОВ уменьшается во времени по двум причинам:

- Уменьшается мощность (энергия) зондирующего сигнала

- Рассеянное излучение ослабляется во столько же раз при распространении вдоль волокна в обратном направлении.

Для коротких зондирующих импульсов мощность обратного рассеяния  $P_s(L, L)$  от некоторого малого участка с координатой  $L$  вблизи этого участка определяется энергией импульса на этом участке  $W(L)$  и коэффициентом обратного рассеяния  $K_s$  волокна (единица измерения  $c^{-1}$ ):

$$P_s(L, L) = W(L)K_s = W_0 A(L)K_s, \quad (1)$$

где  $W_0$  - энергия зондирующего импульса на входе в волокно,  $A(L)$  - интегральное затухание света на участке от торца волокна до тестируемого участка с координатой  $L$ .

Мощность, регистрируемая фотоприемником рефлектометра, меньше приведенной мощности в число раз, равное затуханию света на пути от тестируемого участка до входного торца волокна. Затухание на некотором участке линии связи, построенной из одномодовых волокон, не зависит от направления, следовательно, регистрируемая фотоприемником мощность равна:

$$P_s(L) = A(L)P_s(L, L) = W_0 A^2(L)K_s = P_s(0)A^2(L), \quad (2)$$

где  $P_s(0) = W_0 K_s$ .

В логарифмических единицах выражение (2) преобразуется к следующему виду:

$$P_{SDBm}(L) = P_{SDBm}(0) - 2A_{DB}(L), \quad (3)$$

где  $P_{SDBm}(0) = 10 \log_{10} P_s(0)$ ,  $P_{SDBm}(L) = 10 \log_{10} P_s(L)$  - уровни мощности сигнала обратного рассеяния вблизи входного торца волокна и участка с координатой  $L$  соответственно.  $A_{DB}(L)$  - интегральное затухание в логарифмических единицах (децибелах) на пути от входного торца волокна до участка с координатой  $L$ . Знак «-» в правой части (3) обусловлен тем, что затухание  $A_{DB}(L)$  является положительной величиной.

Зависимость мощности в дБм от времени приведена на рис.3а. Мощность, регистрируемая в моменты времени  $t_A$  и  $t_B$ , определяется удвоенным затуханием света на пути до этих участков. Поскольку задачей измерений является измерение затухания, а не его удвоенного значения, то для удобства работы с рефлектометром прибор пересчитывает измеренную зависимость так, что на вертикальной шкале откладывается значение затухания в дБ, которое вдвое меньше значения разности между уровнем потерь в измеряемой точке и начальным уровнем потерь (рис 3.б):

$$A_{DB}(L) = 0,5[P_{SDBm}(0) - P_{SDBm}(L)], \quad (4)$$

или

$$A_{DB}(L) = 5 \log_{10}[P_s(0)/P_s(L)]. \quad (4a)$$

По горизонтальной шкале отложено расстояние путем пересчета по формуле:

$$L = 0,5tv_{GR}, \quad (5)$$

Где  $v_{GR}$  - групповая скорость распространения импульса по световоду.

Потери ВОЛС в дБ на км  $\alpha \frac{\partial \delta}{\text{км}}$  определяются по формуле

$$\alpha \frac{\partial \delta}{\text{км}} = \frac{5 \log_{10}[P_s(0)/P_s(L)]}{L} \quad (6)$$

## Структура импульсного оптического рефлектометра и функции его элементов

Блок - схема импульсного оптического рефлектометра приведена на рис.4. Световые импульсы относительно большой мощности от встроенного в импульсный оптический рефлектометр источника (импульсного лазера) вводятся в тестируемое волокно через ответвитель, а высокочувствительный приемник измеряет временную зависимость мощности светового сигнала, возвращающегося из тестируемого волокна обратно в рефлектометр.



Рис. 4. Блок-схема импульсного оптического рефлектометра

Источниками зондирующих импульсов в подавляющем большинстве рефлектометров являются полупроводниковые лазеры с прямой модуляцией током накачки. Такие лазеры при фиксированном токе накачки генерируют световые импульсы фиксированной мощности и переменной длительности, задаваемой длительностью импульса тока накачки, вырабатываемого блоком управления. Применяются полупроводниковые лазеры, генерирующие импульсы длительностью от 1 нс до 10 мкс.

Блок управления вырабатывает импульсы тока накачки с частотой, задаваемой устанавливаемой вручную или определяемой автоматически максимальной длиной тестируемого участка ВОЛС. Одновременно на блок обработки данных подаются синхронизирующие электрические импульсы.

Зондирующий световой импульс попадает в тестируемую ВОЛС через разветвитель с двумя рабочими входными и одним выходным портами (рис.5). Обычно в качестве разветвителей используется устройство, выполняемое на основе четырехполосника с двумя входными (1,2) и двумя выходными (3,4) портами, из которых задействованы только три (1,2,3). С двумя входными портами соединены импульсный лазер и приемный преобразователь, а с рабочим выходным портом соединяется тестируемый участок ВОЛС

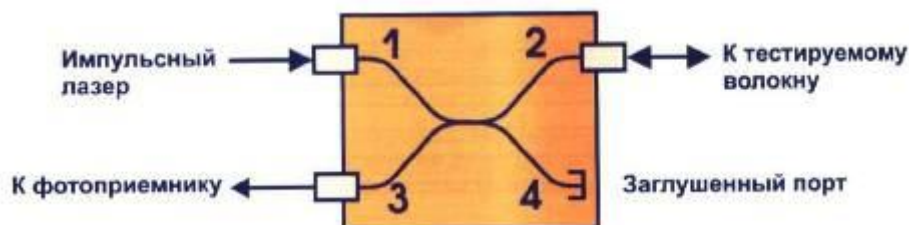


Рис.5. Схема оптического разветвителя.

Четвертый порт разветвителя не используется и закрыт специальным устройством, поглощающим падающее на него излучение без отражения.

С помощью этого же разветвителя сигнал обратного рассеяния от ВОЛС через порт (3) и порт (2) попадает на фотоприемник измерительного преобразователя. Измерительный преобразователь преобразует оптические сигналы в электрические так, что величина

электрического тока преобразователя прямо пропорциональна мощности светового сигнала. В состав измерительного преобразователя наряду с фотоприемником входит смонтированный вместе с ним на одной плате и в одном корпусе предусилитель. Основные требования к приемному преобразователю - высокая чувствительность, малый уровень шумов и широкая полоса частот (последнее требование эквивалентно малой постоянной времени). Наряду с указанными требованиями приемный преобразователь должен иметь максимально возможную линейность преобразования в большом динамическом диапазоне мощностей светового сигнала.

Блок обработки данных - это мозг рефлектометра. В нем происходит обработка электрического сигнала от измерительного преобразователя и строится рефлектограмма, поступающая на дисплей. В этом же блоке осуществляются все виды автоматической обработки рефлектограмм и автоматических измерений.

Одним из основных компонентов блока обработки данных является схема измерения временных задержек. Поскольку расстояние до тестируемого участка ВОЛС определяется путем пересчета измеренной временной задержки соответствующего этому участку рассеянного или отраженного сигнала, то для получения высокой пространственной точности измерений необходимо обеспечить высокую точность измерения временных задержек. Для получения правильного значения расстояния при измерениях рефлектометром важно установить точное значение показателя преломления, т.к. расстояние равно произведению скорости света на групповую скорость, обратно пропорциональную величине показателя преломления волокна.

Показатель преломления волокна зависит от длины волны по двум причинам. Во-первых, из-за того, что показатели преломления сердцевин и кварцевой оболочки зависят от длины волны (материальная дисперсия). Во-вторых, потому что волна распространяется частично в сердцевине, а частично и в оболочке, поэтому показатель преломления волокна принимает некое среднее значение между величиной показателя преломления сердцевин и кварцевой оболочки. При изменении длины волны изменяется глубина проникновения волны в кварцевую оболочку, и, соответственно, величина эффективного показателя преломления

(волноводная дисперсия). Скорость перемещения импульса  $V_r$  (групповая скорость) принято

характеризовать групповым показателем преломления:  $v_r = c / n_r$ . Групповой показатель

преломления  $n_r$  связан с фазовым показателем преломления  $n$  соотношением

$n = n_r - \lambda \frac{\partial n}{\partial \lambda}$ . Величина группового показателя преломления обычно приводится в

спецификациях на оптический кабель. Если этого не сделано, то в этом случае в рефлектометре можно установить среднее значение группового показателя преломления для одномодового волокна  $n_r = 1,467$ .

В современных рефлектометрах блок обработки данных состоит из аналогово-цифрового преобразователя и блока цифровой обработки - специализированного компьютера. Для уменьшения уровня шума и, следовательно, расширения динамического диапазона при сохранении пространственного разрешения в блоке цифровой обработки осуществляется накопление данных от большого числа отраженных сигналов. (Уровень шума уменьшается пропорционально корню квадратному из числа сигналов.)

Сформированная блоком обработки данных в электронном виде рефлектограмма подается на дисплей, либо обрабатывается в специальных блоках автоматической обработки и на дисплей подаются результаты обработки. Рефлектограмма может записываться в память рефлектометра, либо может сравниваться с хранящимися в памяти рефлектограммами.

## Анализ рефлектограммы

Широкое распространение рефлектометров связано с удобством тестирования ВОЛС и отдельных волокон и кабелей этим прибором. На экране рефлектометра в виде графика наглядно представлено изменение относительной мощности сигнала обратного рассеяния в логарифмических единицах с расстоянием. Такой график называется рефлектограммой и по нему можно качественно судить о состоянии тестируемого участка ВОЛС, а также производить целый ряд количественных измерений.

Типичная рефлектограмма импульсного рефлектометра приведена на рис.6.

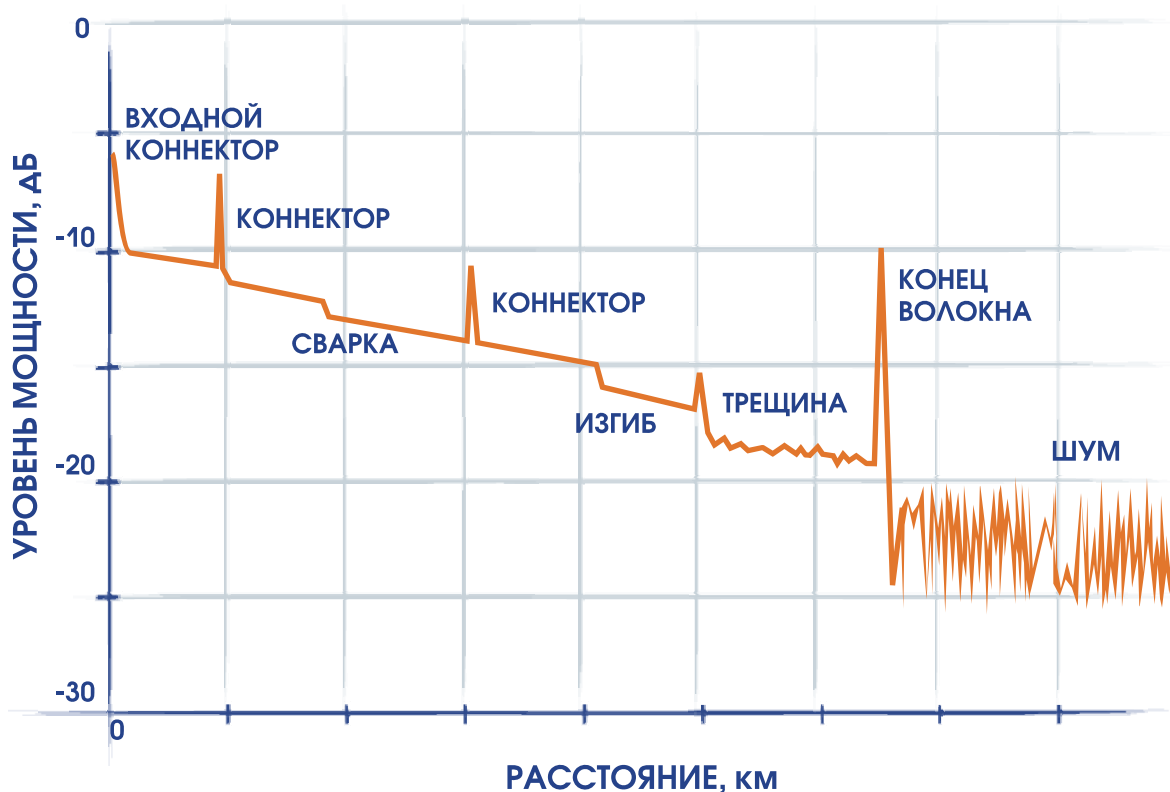


Рис.6. Типичная рефлектограмма импульсного рефлектометра

Вертикальная шкала определяет уровень потерь в логарифмических единицах. Горизонтальная ось соответствует расстоянию от рефлектометра до тестируемого участка.

В типичной рефлектограмме можно выделить участки двух типов:

- Участки, свободные от отражающих или поглощающих точечных объектов
- Участки, непосредственно примыкающие к сильно отражающим или поглощающим точечным объектам.

Вид рефлектограммы на участке первого типа вне зависимости от формы и длительности зондирующего импульса - наклонная прямая. Наклон кривой на рефлектограмме характеризует коэффициент затухания волокна в децибелах. Измерение потерь или коэффициента затухания на таких участках с помощью рефлектометра дает достаточно высокую точность, не смотря на то, что измерения производятся косвенно – по затуханию величины рассеянного сигнала. Дело в том, что коэффициент обратного рассеяния в телекоммуникационном волокне можно считать постоянным с высокой точностью.

Соединения волокон и точечные дефекты с примыкающими к ним областями относятся к участкам второго типа. Им соответствуют пики или ступеньки на рефлектограмме, которые называются соответственно отражающими и поглощающими событиями. Рефлектометр дает возможность точно определить расстояние до таких событий (локализовать дефект). С помощью рефлектометра можно приближенно вычислять потери на таких элементах, а также оценить интегральные потери в целом по всему тестируемому участку. Однако необходимо



помнить о возможных ошибках измерений, связанных с косвенным характером измерения потерь, и о возможности появления ложных сигналов.

Пиками характеризуются отражающие элементы. Мощность отраженного сигнала, а, следовательно, положение вершины пика, определяется мощностью зондирующего импульса и коэффициентом отражения, но не зависит от его длительности. К отражающим элементам относятся механические соединения. Пик на рефлектограмме обусловлен френелевским отражением на торцах соединяемых волокон,, а вносимые разъемом потери приводят к снижению величины рассеянного сигнала сразу за ним.

Амплитуда пика характеризует качество соединения волокон. Так сварные соединения, как правило, являются не отражающими, а наличие даже слабого пика говорит о плохом качестве сварки. Отсутствие отражения на хороших сварных соединениях связано с отсутствием скачка показателя преломления, т.к. сколотые торцы волокон сплавляются друг с другом. Однако на сварных соединениях потери все-таки есть. Хорошо сваренное соединение трудно "засечь", так как потери на нем невелики и появляющаяся «ступенька» на рефлектограмме очень мала.

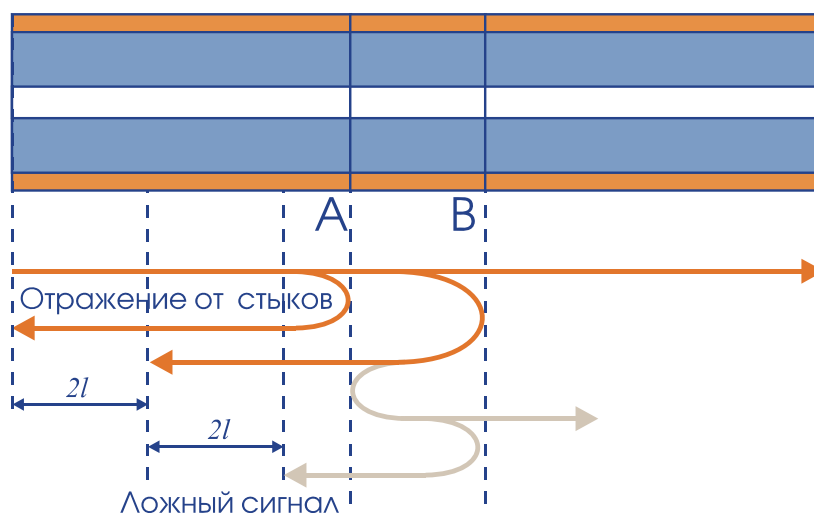
Потери на микроизгибах имеют аналогичные характеристики и их трудно отличить от потерь на сварных или механических соединениях.

Таким образом, рефлектометр оперативно предоставляет наглядную информацию, позволяющую судить о качестве ВОЛС, дает возможность обнаружить и локализовать подозрительные участки. Учитывая возможные источники ошибок, и приняв меры по их устранению с помощью рефлектометра можно проводить измерения потерь на соединениях и на прочих участках ВОЛС.

## **Ложные сигналы (духи) и ошибки при измерениях потерь на соединениях**

При стандартном анализе рефлектограмм предполагается, что в прямом направлении распространяется только один зондирующий световой импульс и рефлектограмма формируется в результате однократного рассеяния или отражения этого импульса. Однако это предположение не всегда выполняется. Если тестируемый участок ВОЛС содержит более одного элемента с сильным отражением, то возникают многократные отражения от каждой пары сильно отражающих элементов. Следствие многократных отражений – появление ложных сигналов или «духов».

Для объяснения причины возникновения ложных сигналов рассмотрим прохождение зондирующего импульса через участок ВОЛС с двумя сильно отражающими стыками (см. рис.7.). Ложный сигнал формируется в результате трех последовательных отражений соответственно от стыка В, стыка А и снова от стыка В. Ложный сигнал расположен симметрично отражению от стыка А относительно отражения от стыка В, а его амплитуда значительно меньше амплитуд сигналов от реальных отражающих стыков.



*Рис.7. Формирование ложного сигнала рефлектометра при наличии двух отражающих элементов ВОЛС.*

При измерении рефлектометром потерь на соединение волокон различного типа существует принципиальный источник ошибок – неодинаковость параметров стыкуемых волокон. Так, например, измеренное по рефлектограмме значение потерь на соединение отличается от действительного значения на величину разности коэффициентов обратного рассеяния в логарифмических единицах. Ситуацию, в которой измерения потерь на соединение дают ошибки такого рода, иллюстрирует рефлектограмма на рис. 8. Соединение участков I и II выглядит так, как будто в нем происходит усиление сигнала. Наоборот, соединение участков II и III выглядит вносящим потери, превышающие их реальную величину. Рефлектограмма на рис. 8 соответствует отрезку ВОЛС, содержащему участок волокна с повышенным коэффициентом обратного рассеяния.

Измерения рефлектометром потерь на соединение волокон дадут правильное значение потерь только в том случае, если параметры двух волокон равны. Если они не равны, но известно их соотношение, то измеренное значение может быть скорректировано. Однако наибольшую точность измерений дает использование двух рефлектограмм, снятых с разных концов ВОЛС. Действительные потери на соединение равны полусумме измерений из двух рефлектограмм, снятых с разных концов.

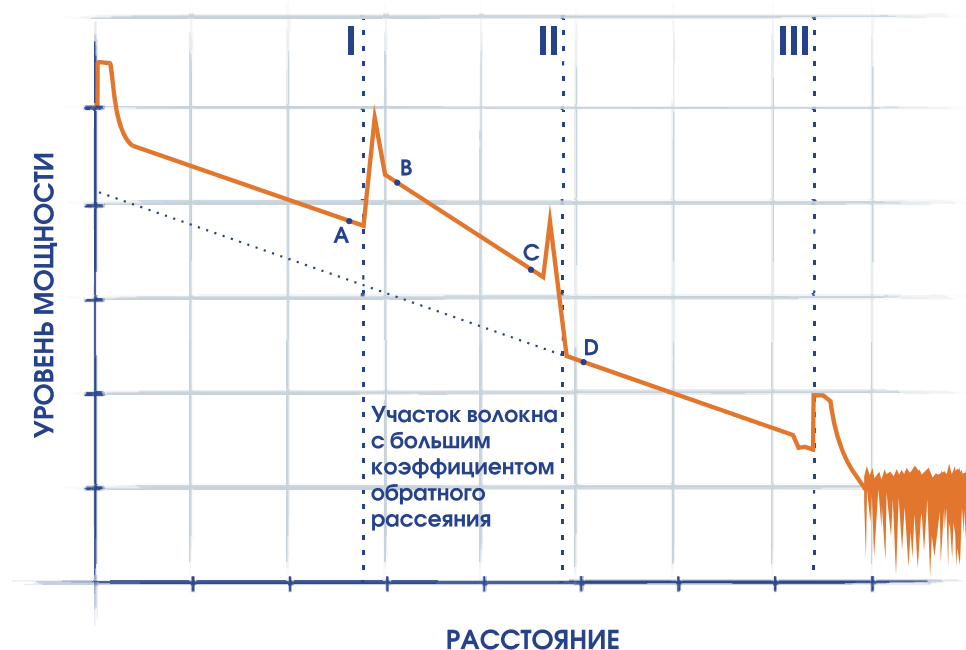


Рис. 8. Рефлектограмма отрезка ВОЛС, содержащего участок волокна с большим коэффициентом обратного рассеяния.

### Технические характеристики импульсного оптического рефлектометра

С точки зрения пользователя, при работе с оптическим рефлектометром важно знать какова максимальная длина тестируемого участка ВОЛС, какова точность определения расстояния до обнаруженных дефектов, дефекты с какой величиной минимальных потерь могут быть обнаружены в тех или иных условиях, какова точность измерения потерь.

В большинстве случаев ответ на поставленные вопросы зависит не только от возможностей рефлектометра, но и от характеристик тестируемого объекта (участка ВОЛС или отдельного волокна). Например, максимальная длина тестируемых одним и тем же рефлектометром волокон зависит от коэффициента затухания света в них.

Технические возможности рефлектометров, определенные таким образом, что они не связаны с характеристиками конкретного тестируемого объекта, а измерены в стандартных условиях, называются техническими характеристиками. По известным техническим характеристикам можно установить возможность проведения измерений и достижимую точность измерений в конкретных условиях.

К техническим характеристикам рефлектометра относятся следующие:

- **Динамический диапазон и диапазон измерений**
- **Мертвые зоны рефлектометра**
- **Пространственная разрешающая способность**
- **Точность измерения расстояния**
- **Точность измерения затухания**

**Динамический диапазон** рефлектометра  $D_{dB}$  выражается в дБ и позволяет оценить максимальную длину тестируемого участка ВОЛС по формуле:

$$L = D_{dB} / \alpha_{dB}$$

Динамический диапазон оптического рефлектометра определяется как разность между уровнем мощности  $P_{S0}$  обратного рассеяния в самом начале волокна и определенным тем или иным способом уровнем шумов  $P_{NOIS}$  при заданном времени измерений в соответствии с формулой  $D_{dB} = 5 \log_{10} P_{S0} - 5 \log_{10} P_{NOIS}$ ,  $\alpha_{dB}$  - потери ВОЛС в дБ/км.

Динамический диапазон представляет собой наиболее важный параметр, он часто используется для классификации рефлектометров и предоставляет информацию не только о максимальном допустимом уровне потерь в тестируемой ВОЛС, но и о времени, необходимом для осуществления измерений.

Отметим, что в приведенном определении начальный уровень обратного отражения не является собственной характеристикой рефлектометра, т.к. зависит от коэффициента обратного рассеяния.

В современных волокнах флуктуации коэффициента обратного рэлеевского рассеяния обусловлены, в первую очередь, флуктуациями диаметра модового пятна. Из-за случайного характера вариаций диаметра модового пятна, их разность с одинаковой вероятностью может быть как положительной, так и отрицательной. Поэтому на рефлектограммах с примерно одинаковой вероятностью наблюдаются ступеньки, направленные как вверх, так и вниз.

Коэффициент обратного рэлеевского рассеяния прямо пропорционален произведению коэффициента прямого рэлеевского рассеяния на коэффициент захвата рассеянного излучения модой волокна. В свою очередь, коэффициент захвата прямо пропорционален квадрату апертурного угла моды и обратно пропорционален квадрату диаметра модового пятна.

Неопределенность вносит, также, возможное различие в определении критического уровня шума, а также тот факт, что уровень шума зависит от времени усреднения.

Поэтому целесообразно определять динамический диапазон в одинаковых, общепринятых, т.е. стандартных условиях.

Наиболее часто уровень шумов устанавливается двумя способами: по среднеквадратичному значению либо по уровню 98% вероятности. Для гауссовского шума уровень 98% превышает примерно в 2,4 раза среднеквадратичное значение. Поэтому, величина динамического диапазона, определяемая по среднеквадратичному уровню шума, примерно на 1,8 дБ больше величины динамического диапазона, определенной по 98% уровню шумов.

Величина динамического диапазона зависит от параметров, устанавливаемых пользователем: длительности импульсов, времени усреднения сигнала и диапазона измеряемых длин. Так, например, при увеличении длительности импульса в 1000 раз (от  $t_1=10$  нс. до  $t_2=10$  мкс) коэффициент обратного рэлеевского рассеяния увеличивается (по шкале рефлектометра) на  $5 \log\left(\frac{t_1}{t_2}\right) = 15 \text{ дБ}$ . Так как уровень шумов (в отсутствие сигнала)

при этом не меняется, то динамический диапазон тоже увеличивается на  $5 \log\left(\frac{t_1}{t_2}\right) = 15 \text{ дБ}$

При увеличении времени усреднения, коэффициент рэлеевского рассеяния не меняется, зато уменьшается среднеквадратичное значение шума. В первом приближении шум можно полагать белым (гауссовым). Поэтому его среднеквадратичное значение изменяется обратно пропорционально квадратному корню из времени усреднения сигнала.

Это значит, что при увеличении времени усреднения от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , уровень шума

уменьшается (а динамический диапазон увеличивается) по шкале рефлектометр на

$$2,5 \log\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right).$$

На сегодняшний день динамический диапазон является основным параметром, по которому проводится сравнение различных моделей рефлектометров. Так как его величина увеличивается с увеличением длительности импульсов  $t$  и времени усреднения сигнала  $T$ , то обычно значения динамического диапазона приводят при максимальных для данного прибора значениях  $t$  и  $T$ . МЭК рекомендует при сравнении динамических диапазонов рефлектометров использовать следующие величины:  $t=10$  мкс и  $T=3$  мин.

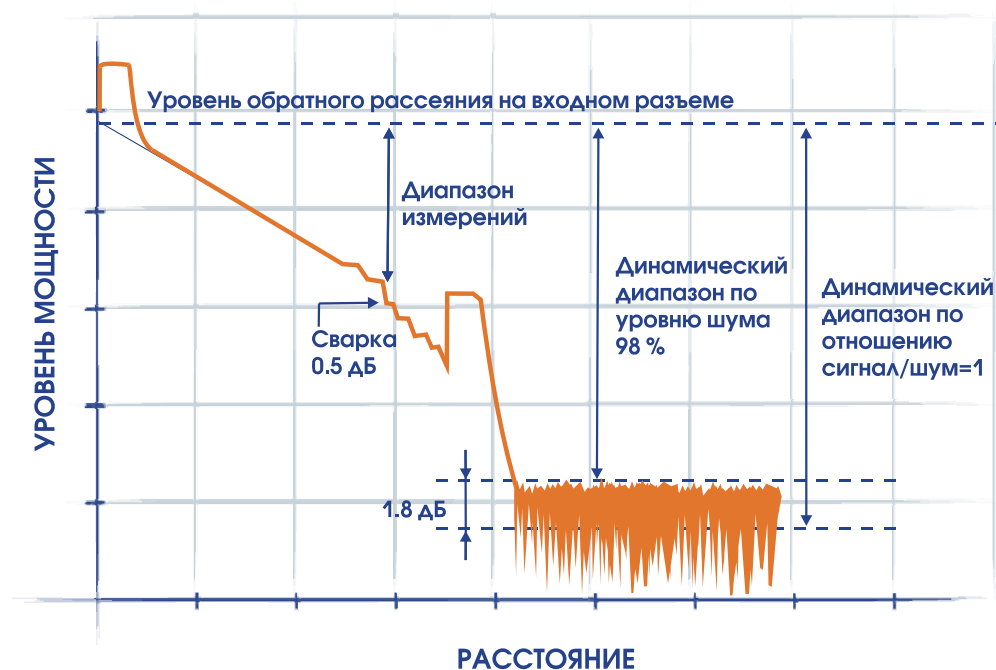


Рис.9 Динамический диапазон и диапазон измерений

Близкой к динамическому диапазону характеристикой рефлектометра является **диапазон измерений**.

Диапазон измерений определяется как максимальное значение потерь на участке от входа в волокно до тестируемого элемента, при котором параметры этого элемента могут быть аккуратно измерены. Рекомендуется в качестве такого элемента использовать сварное соединение с потерями 0,5 дБ.

Так как точность измерения потерь зависит от отношения сигнал/шум (SNR) в данной точке, то приборы с более высоким динамическим диапазоном, при прочих равных условиях, обеспечивают больший диапазон измерений. Кроме того, на величину диапазона измерений существенно влияет алгоритм программного обеспечения, используемый для выделения сигнала на фоне сильных шумов. На рис.9 показаны значения динамического диапазона и диапазона измерений.

### Мертвые зоны рефлектометра

Мертвые зоны рефлектометра это участки вблизи отражающих элементов, в которых затруднены измерения. Область вблизи отражающего события, в пределах которой невозможно обнаружить другое отражающее событие, называется мертвой зоной отражения. Область вблизи отражающего события, в пределах которой невозможно точно

измерить уровень мощности обратного рассеяния называется мертвой зоной затухания, т.к. этот участок волокна исключается из процесса измерения затухания.

Общеприняты следующие определения двух типов мертвых зон.

Мертвая зона отражения определяется расстоянием между началом отражения и точкой на спаде пика отражения с уровнем - 1.5 дБ относительно вершины.

Мертвая зона затухания определяется расстоянием от начала отражения до точки, в которой уровень сигнала фотоприемника отличается не более чем на  $\pm 0.5$  дБ от уровня обратного рассеяния.

Приведенные определения двух типов мертвых зон иллюстрирует рис.10.

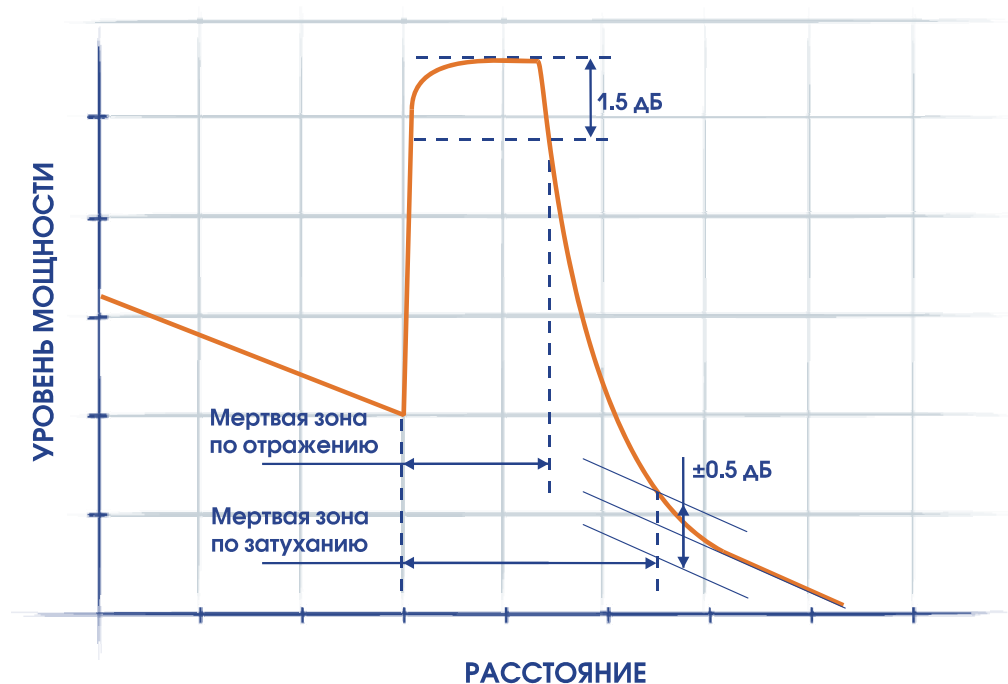


Рис.10. Определение мертвой зона отражения и мертвой зона затухания.

На величину мертвой зоны оказывает влияние, также, шаг дискретизации, которым можно пренебречь только в том случае, если его величина много меньше величины мертвой зоны, определенной без его учета.

### **Пространственная разрешающая способность**

Как и мертвая зона отражения, пространственная разрешающая способность характеризует возможность с помощью рефлектометра различить два события. Но если в определении мертвой зоны отражения рассматриваются два отражающих события, то пространственная разрешающая способность характеризует способность различать поглощающее событие на фоне отражающего. Пространственная разрешающая способность вблизи входного торца определяется как минимальное расстояние, на котором рефлектометр позволяет обнаружить и аккуратно измерить поглощающее событие (например, сварное соединение).

Предложены спецификации пространственной разрешающей способности также и для одиночных событий. Для сварки с потерями менее 1 дБ разрешающая способность

определяется как длина ступеньки между уровнями 10% и 90% ее высоты. Для одиночного отражающего события пространственная разрешающая способность определяется как длительность пика по уровню 50%.

Пространственная разрешающая способность зависит не только от длительности импульса, но и от ширины полосы пропускания предусилителя. Для оценки величины разрешающей способности одиночного отражающего события можно использовать приближенное выражение:

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

Где  $\Delta t$  - длительность импульса

$\Delta f$  - ширина полосы усилителя

$n$  – показатель преломления

### **Точность измерения расстояния**

Локализация неисправностей является одной из важнейших задач при тестировании ВОЛС. При использовании рефлектометра для локализации дефекта необходимо помнить, что рефлектометр измеряет время прохождения света до неисправности и обратно. Измеренное значение времени используется для вычисления расстояния от торца до неисправности вдоль волокна. Длина оптического кабеля меньше этой длины, причем отношение длин волокна и кабеля - индивидуальная характеристика кабеля.

Точность определения расстояния характеризуется величиной абсолютной и относительной погрешности измерения расстояния.

Необходимость пересчета и возможная неточность внутренних часов рефлектометра вызывают появление постоянной относительной ошибки, называемой ошибкой масштабирования. Абсолютная ошибка  $\Delta m$  определения длины волокна равна произведению относительной ошибки  $d_m$  масштабирования на длину  $L$  :

$$\Delta m = d_m L$$

Вклад в величину относительной ошибки масштабирования дают ошибка в определении показателя преломления и нестабильность тактовой частоты (внутренних часов).

Другими источниками ошибок являются ошибки дискретизации и ошибки локализации.

Ошибки дискретизации определяются скоростью работы аналого-цифрового преобразователя, задающей период между двумя последовательными отсчетами.

Ошибка локализации обусловлена неточностью определения положения события из-за наличия шумов и тесно связана с пространственной разрешающей способностью рефлектометра. Следует сказать, что ошибка локализации существенно зависит от типа события и от алгоритма определения его положения, а также от уровня шума в точке измерений.

Расстояние до событий может определяться оператором с использованием курсора, | устанавливаемого в точке начала пика и ступеньки. В этом случае на точность определения расстояния могут оказывать влияние субъективные факторы, в том числе опыт оператора.

### **Точность измерения затухания.**

Затухание рассчитывается рефлектометром косвенно, по величине сигнала обратного рассеяния. Изменение коэффициента обратного рассеяния может приводить к ошибкам измерений, не связанным с техническими характеристиками рефлектометра.

Поэтому точность измерения затухания целесообразно специфицировать для поглощающих событий и для отрезков однородного волокна.

Ошибки измерений затухания определяются ошибками измерения мощности сигнала обратного рассеяния.

В большинстве рефлектометров световой сигнал преобразуется в электрический при помощи измерительного преобразования (см. рис.4.). Измерительный преобразователь состоит из фотоприемника и предусилителя.

В идеальном преобразователе электрический ток (иногда - напряжение) должен быть прямо пропорционален мощности светового сигнала. Выходной ток (напряжение) измерительного преобразователя измеряется цифровым амперметром (вольтметром).

Ошибки измерений возникают из-за наличия шумов преобразователя и случайных ошибок измерителя, а также из-за нелинейности характеристик фотоприемника, предусилителя и амперметра (вольтметра).

В рефлектометрах ошибку измерений затухания характеризуют линейностью рефлектометра LN [дБ/дБ], равной отношению модуля отклонения  $\Delta A$  дБ измеренного значения от действительного  $A$  дБ к действительному значению затухания в дБ.

$$L = \frac{\Delta A \text{ дБ}}{A \text{ дБ}}$$

### **Потери на стыках волокон.**

На вносимое затухание смонтированного участка помимо собственного затухания волокна оказывает влияние качество соединений различных участков линии (разъемные и не разъемные соединения – сварные соединения, коннекторы и т.д.)

Условно потери в соединениях можно разделить на два вида

1. Потери из-за различий в свойствах соединяемых волноводов
2. Потери, связанные с плохим качеством соединения.

### **Неодинаковые показатели преломления сердцевин соединяемых волокон.**

Потери из-за различия показателей преломлений сердцевин волокон являются следствием френелевского отражения на границе раздела двух сред с разными показателями преломления. В предположении, что волокна имеют ступенчатый профиль показателя преломления и соединение выполнено без дефектов потери, возникающие по причине стыковки двух различных волокон, могут быть описаны следующим образом:

$$\alpha = -10 \cdot \lg \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$



### Различные числовые апертуры соединяемых ОВ.

Пусть волокно, из которого приходит излучение, имеет числовую апертуру  $NA_1$ , а в которое излучение вводится  $NA_2$ , соответственно. В таком случае, при отсутствии дефектов в месте соединения потери составят

$$\alpha = 20 \cdot \lg \frac{NA_1}{NA_2} \text{ при } NA_1 > NA_2 \text{ и } \alpha = 0 \text{ при } NA_1 \leq NA_2$$

### Различные диаметры сердцевин соединяемых ОВ.

Пусть  $d_1$  и  $d_2$  диаметры сердцевин соединяемых волокон. В таком случае потери могут быть описаны следующим образом:

$$\alpha = 20 \cdot \lg \frac{d_1}{d_2} \text{ при } d_1 > d_2 \text{ и } \alpha = 0 \text{ при } d_1 \leq d_2$$

### Радиальное смещение волокон.

Пусть  $d$  – диаметр волокна,  $h$  – величина осевого смещения. В таком случае, при условии малого смещения ( $h \ll d$ ) потери описываются следующей формулой:

$$\alpha \approx 4,34 \frac{h}{d}$$

## Выполнение Работы

### Порядок включения установки

1. Включить блок питания рефлектометра
2. Включить рефлектометр
3. Включить компьютер

### Порядок выключения установки

1. Выключить компьютер
2. Выключить рефлектометр
3. Выключить блок питания

### Меры предосторожности

Запрещается снимать защитный колпачок со свободного конца катушки световода и подносить к глазам открытый свободный конец катушки световода.

### Калибровка установки.

Выставить следующие значения:

F-WL: 1.55

n:1.468

## Упражнение 1. Определение длины катушки.

Для определения длины катушки устанавливаем длину  $L_{\max}$  и  $L_2$  в 108 км, количество измерений – 5. Далее, переходя из раздела Meas в раздел View, определяем длину оптоволокна по графику. Найдя длину, в дальнейшем работаем с наиболее близким к найденному значениями  $L_{\max}$  (отвечает за максимально далекую точку измерений) и  $L_2$  (отвечает за конечную точку измерений). При этом  $L_2$  должна быть близкой по значению к найденной длине катушки, но больше нее.

## Упражнение 2. Зависимость динамического диапазона от длительности импульса.

Устанавливаем выбранное в предыдущем упражнении значение  $L_{\max}$ , выбираем минимальную длительность импульса  $T_p=200$  нс, количество измерений  $N_{rep}=20$ . По графику находим динамический диапазон. Меняем импульс на более длительный и проводим повторные измерения. Проведя измерения для всех длительностей импульса, строим график зависимости динамического диапазона от длительности импульса.

## Упражнение 3. Зависимость динамического диапазона от числа измерений

Устанавливаем максимальную длительность импульса и снимаем зависимость динамического диапазона от количества измерений. Провести опыт не менее чем для 10 различных количеств измерений с шагом минимум в 5 измерений. Результаты представить в виде таблицы.

## Упражнение 4. Зависимость мертвой зоны от длительности импульса

Устанавливая те же пределы измерений, что и в упражнении 2, измеряем зависимость мертвой зоны от длительности импульса.

## Упражнение 5. Измерение полных потерь и затухания в Db/km катушки волокна.

Устанавливаем количество измерений 40, максимальную длительность импульса и пределы измерений длины волокна, определенные в упражнении 1. В режиме View устанавливаем красный репер, отвечающую за начальную точку измерений на отметку в 3 км, синий репер – на отметку в 12 км. Далее, с шагом в 500 метров записываем значения  $\Delta$  дельта (потери) и Db/km (затухания) рефлектометра. Полученные данные предоставить в виде таблицы.

## Литература

1. Листвин А.В., Листвин В.Н., Рефлектометрия оптических волокон, Москва, «ЛЕСАР арт», 2005.
2. Beller J. OTDRs and backscatter measurements. In “Fiber optics test and measurements”, edited by Derickson D., New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1998.