

3. Метод обратного рассеяния. Оптические рефлектометры.

3.1. Классификация рассеяния

Процесс рассеяния света состоит в заимствовании молекулой или частицей некоторой доли энергии у распространяющейся в среде электромагнитной волны и излучении этой энергии в окружающее пространство. Процесс рассеяния можно представить следующей схемой: рассеяние = возбуждение + переизлучение. В результате могут происходить изменения характеристик потока излучения: пространственного распределения интенсивности, частотного спектра, поляризации. Помимо переизлучения, часть энергии падающей электромагнитной волны может быть преобразована в другие виды энергии (например, в тепло) – происходит поглощение. При распространении в среде интенсивность падающего света ослабляется с расстоянием (закон Бугера–Ламберта–Бера): $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$, где I_0 и I – интенсивности падающего света и прошедшего через среду толщиной z , α – коэффициент поглощения среды. Как поглощение, так и рассеяние вносят вклады в общее ослабление потока: $\alpha = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{расс}}$.

По характеру изменения частоты излучения различают:

- 1) упругое рассеяние, происходящее без существенного изменения частоты $\omega \approx \omega_0$. В последнем случае спектр излучения меняется: хотя центральная частота совпадает с частотой возбуждающего излучения, но амплитуда и фаза оказываются модулированы в результате процессов, вызванных флуктуациями рассеивающих центров;
- 2) неупругое рассеяние (комбинационное рассеяние и рассеяние Манделъштама–Бриллюэна), приводящее к появлению в рассеянном свете линий $\omega_0 \pm \Omega$, смещенных по частоте относительно возбуждающего излучения ω_0 (см. рис. 1).

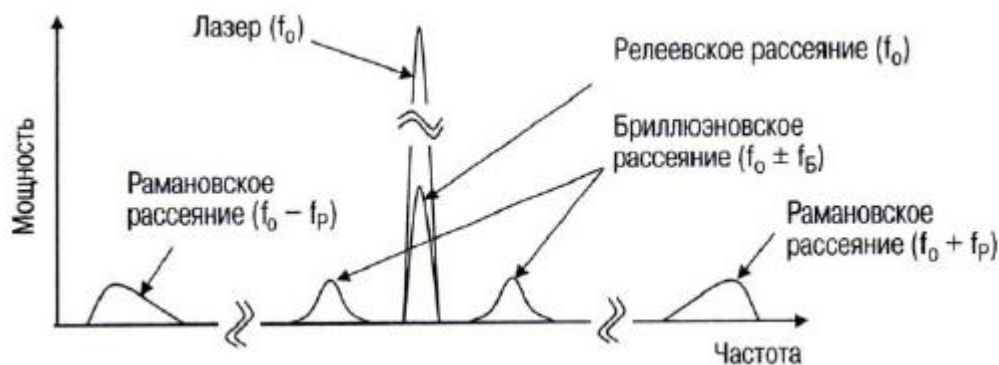


Рис.3.1. Схема спектра рассеянного излучения (Отстройка частоты $f_B \sim 10 \dots 11$ ГГц, $f_R \sim 13$ ТГц).

Упругое рассеяние

Интенсивность и пространственное распределение рассеянного излучения зависят от соотношения между длиной падающей волны λ и размером частиц d . Рассеяние Рэлея для частиц малых по сравнению с длиной волны ($d < \lambda/10$). В этом предельном случае все элементарные диполи рассеивающей частицы излучают когерентно, в одной фазе. Излучение распространяется во все стороны.

Для сравнения, коэффициент спонтанного бриллюэновского рассеяния $g_B \sim 0.03/\lambda^4$ примерно на 14 дБ меньше коэффициента релеевоого рассеяния $\alpha_R \sim 0.75/\lambda^4$, где λ – длина волны излучения (в мкм).

Неупругое рассеяние

Неупругое рассеяние связано с коррелированными периодическими изменениями оптических свойств среды, вызванными колебаниями атомов в молекулах (комбинационное или *рамановское* рассеяние) или распространением звуковых волн (рассеяние *Мандельштама–Бриллюэна*). В спектре рассеянного излучения появляются симметрично расположенные компоненты (см. рис. 1) с частотами $\omega_o - \Omega_{\text{мол}}$ (стоксов сателлит) и $\omega_o + \Omega_{\text{мол}}$ (антистоксов сателлит).

3.2. Принцип работы рефлектометра на рэлеевском рассеянии

3.2.1. Рэлеевское рассеяние.

Рэлеевское рассеяние является одним из основных факторов, ограничивающих минимальный уровень оптических потерь в волоконных световодах на основе кварцевого стекла в ближней инфракрасной области спектра. Причиной возникновения рэлеевского рассеяния являются статистические флуктуации состава и плотности стекла, замороженные в стекле при его остывании. В однокомпонентных стеклах величина оптических потерь, обусловленных рэлеевским рассеянием за счет флуктуаций плотности стекла определяется формулой:

$$\alpha_{\text{рел.р.}} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1) \beta_k T_f$$

где λ - длина волны света, n - показатель преломления стекла, k - постоянная Больцмана, β - изотермическая сжимаемость при фиктивной температуре T_f (температуре, при которой “замerзают” флуктуации в стекле). Фиктивная температура может существенно отличаться от температуры стеклования и зависит как от состава стекла, так и от его температурной предыстории. В многокомпонентных стеклах к флуктуациям плотности добавляются флуктуации концентрации оксидов, входящих в состав стекла. Спектральная зависимость оптических потерь за счет рэлеевского рассеяния остается прежней:

$$\alpha_{\text{рэл.}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Величина концентрационного рассеяния и, соответственно, коэффициент рэлеевского рассеяния зависит от термодинамических параметров стекла, которые не всегда удается рассчитать теоретически. Обычно зависимость коэффициента рэлеевского рассеяния от концентрации легирующих добавок определяют экспериментально. Примеры некоторых измеренных значений представлены в таблице.

Коэффициент рэлеевского рассеяния, дБ мкм ⁴ /км	Световод	Состав легирующих добавок	Диапазон концентраций, Δ
0,7 (1+0,57 Δ)	Многомодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0 – 3%
0,73(1+0,61 Δ)	Одномодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0 – 1%
0,75(1+0,58 Δ)	Одномодовый	Ge O ₂ – Si O ₂	0,4 – 3%

Где Δ – относительный показатель преломления легированного стекла, выраженный в процентах: $\Delta = \frac{n - n_k}{n_k} 100\%$, n_k – показатель преломления нелегированного кварцевого стекла, n – показатель преломления равномерно легированного стекла, или максимальное значение показателя в сердцевине исследуемого световода.

3.2.2. Конструкция рефлектометра.

Принцип действия OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) во многом такой же, как и у импульсных рефлектометров, применяемых для тестирования электрических кабелей. Рефлектометр посылает в линию мощный зондирующий оптический импульс и измеряют мощность и время запаздывания импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр. В оптических же волокнах обратная волна образуется не только за счет отражения от больших (по сравнению с длиной волны) дефектов, но и за счет релеевского рассеяния. Рассеяние света происходит на флуктуациях показателя преломления кварцевого стекла, застывших при вытяжке волокна. Размер этих неоднородностей (рэлеевских центров) мал по сравнению с длиной волны и свет на них рассеивается во все стороны, в том числе и назад. Величина коэффициента обратного рассеяния зависит от многих параметров световода:

$$\sigma \sim \frac{3\alpha_{\text{рэл.р.}} NA^2 V_2}{16N_1^2(q+1)}$$

где NA – числовая апертура, V_2 – групповая скорость, N_1 – осевой индекс рефракции, q – индекс профиля световода.

Доля мощности света, рассеиваемая назад в моду волокна крайне мала. Например, при ширине импульса 1м (длительность импульса 10 нс) коэффициент обратного рэлеевского рассеяния составляет величину около -70 дБ. Поэтому, в OTDR в волокно посылаются импульсы большой мощности и большой длительности, а для детектирования рассеянных назад импульсов света применяются высокочувствительные фотоприемники.

В большинстве моделей OTDR используется модульная конструкция (рис. 3.1). Она содержит базовый модуль и несколько сменных оптических модулей. Оптический модуль включает в себя лазерный диод, фотоприемник, оптический ответвитель и оптический разъем. Базовый модуль представляет собой персональный компьютер, приспособленный для обработки сигнала и вывода его на дисплей.

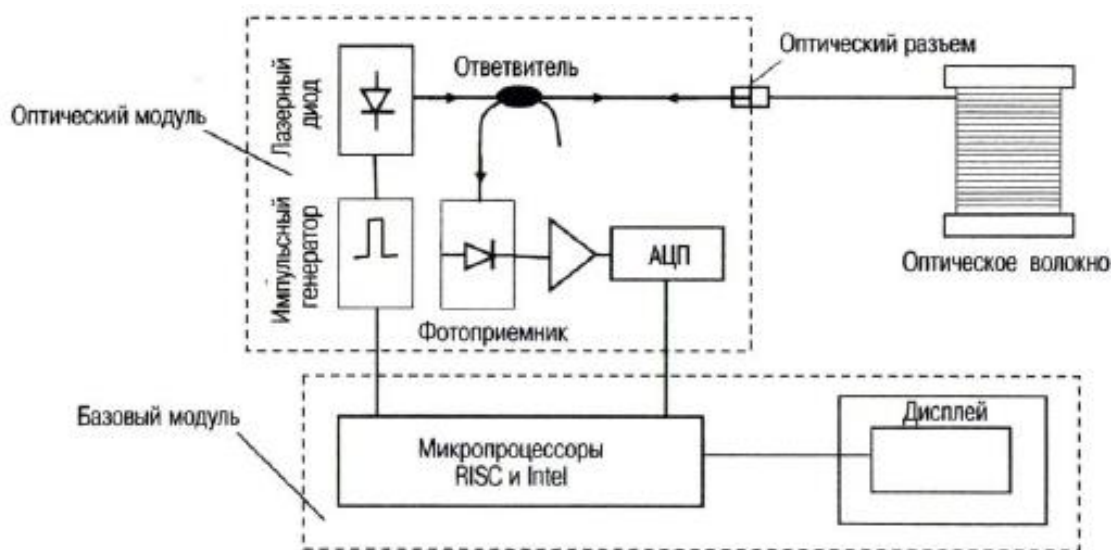


Рис.3.1. Блок-схема рефлектометра на рэлеевском рассеянии.

Важным достоинством рефлектометрических измерений является то, что в них измерительный прибор подключается только к одному концу линии. После того, как линия смонтирована, измеряются потери во всех соединениях волокон и расстояния до

них. При этом фиксируется рефлектограмма всего регенерационного участка линии со всеми её особенностями, указывающими местоположение сварных соединений волокон и величину потерь в них. Эта рефлектограмма используется для географической привязки к местности и в дальнейшем служит для контроля деградации линии в процессе её старения.

3.2.3. Основные параметры рефлектометра

Динамический диапазон.

В соответствии с рекомендацией Международной Электротехнической Комиссии (IEC – International Electrotechnical Commission) динамический диапазон рефлектометра D_{IEC} определяется как разность между уровнем сигнала обратного рэлеевского рассеяния в начале рефлектограммы и пиковым значением шумов в отсутствие сигнала. Уровень сигнала обратного рэлеевского рассеяния находится путем экстраполяции прямолинейного наклонного участка рефлектограммы в начало рефлектограммы. При увеличении времени усреднения коэффициент рэлеевского рассеяния не меняется, но зато уменьшается среднеквадратичное значение шума. Так как в первом приближении шум можно полагать белым (гауссовым), то его среднеквадратичное значение изменяется обратно пропорционально квадратному корню из времени усреднения сигнала. Это значит, что при увеличении времени усреднения от t_1 до t_2 уровень шума уменьшится (а динамический диапазон увеличится) по шкале рефлектометра всего лишь на $2.5\log(t_2/t_1)$.

В логарифмических единицах (дБ и дБм) (мы их выделяем в тексте жирным курсивом) динамический диапазон рефлектометра равен полуразности между мощностью, рассеянной назад в начале волокна, p_c и эквивалентной шумовой мощностью на входе фотоприемника $p_{ш}$ (мощностью света при которой отклик фотоприемника равен среднеквадратичному значению шума):

$$D = \frac{p_c - p_{ш}}{2}$$

Мощность, рассеянная назад в начале волокна, p_c выражается через мощность источника излучения p_u (введенную в волокно), потери в ответвителе η и коэффициент обратного рэлеевского рассеяния q , как:

$$p_c = p_u - \eta + q.$$

А эквивалентная шумовая мощность на входе фотоприемника $p_{ш}$ выражается через пороговую чувствительность фотоприемника p_{np} и b – выигрыш в отношении сигнал/шум за счет усреднения импульсов: $p_{ш} = p_{np} - b$. В результате получаем выражение:

$$D = \frac{p_u - \eta + q - p_{np} + b}{2}$$

После того, как в рефлектометре установлен соответствующий оптический модуль, мощность источника излучения p_u , пороговая чувствительность фотоприемника p_{np} и величина потерь в ответвителе η являются уже заданными величинами. Пользователь может влиять только на коэффициент обратного рэлеевского рассеяния q (изменяя длительность импульсов) и на выигрыш b (изменяя время усреднения импульсов).

Коэффициент обратного рэлеевского рассеяния (его значение приводится в спецификации на волокно) у разных производителей волокон отличается на несколько дБ. Для оценки обычно используют значение

$$q = -80\text{дБ} + 10\lg\left(\frac{\tau[\text{нс}]}{1[\text{нс}]}\right)$$

где τ – длительность импульсов. В большинстве моделей OTDR длительность импульсов можно менять от 10 нс до 10 мкс, что позволяет увеличить коэффициент обратного рэлеевского рассеяния на 30 дБ и, соответственно, динамический диапазон рефлектометра на 15 дБ.

Таким образом, диапазон измерения рефлектометром определяется, как максимальное ослабление, которое прибор способен точно измерить. Так как точность измерения в конкретной точке зависит от отношения сигнал/шум, преимущество имеют приборы с более высоким динамическим диапазоном. Динамический диапазон обусловлен используемыми компонентами, с одной стороны, и алгоритмами снижения шума, с другой стороны.

Мертвые зоны

Мертвые зоны всегда связаны с наличием отражений и вызваны насыщением приемника рефлектометра при поступлении на его вход отраженного сигнала высокого уровня. В этом случае приемнику потребуется некоторое время для восстановления чувствительности после перегрузки, что приводит к потере информации после насыщения. Как результат, сегмент световода за данным отражательным событием оказывается исключенным из процесса тестирования.

Мертвые зоны по событию

Мертвая зона по отражению определяется расстоянием между началом отражения и точкой с уровнем $-1,5$ дБ от вершины понижающегося отрезка кривой отражения. После этого следующие отражательные события могут быть идентифицированы.

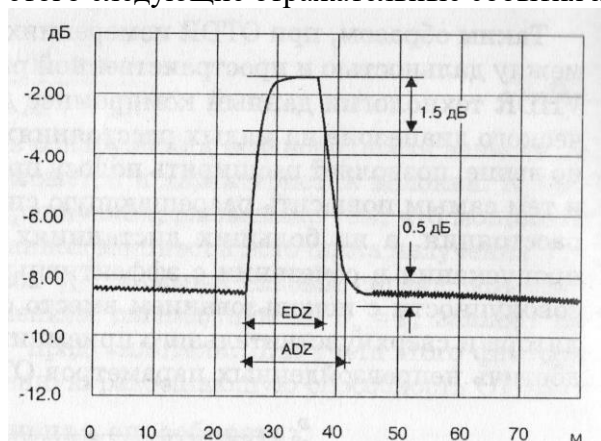


Рис.3.2. Мертвые зоны по отражению и затуханию.

Мертвые зоны по затуханию

Мертвая зона по затуханию определяется расстоянием от начала отражения до точки, в которой произошло восстановление чувствительности приемника с попом в $\pm 0,5$ дБ от установившейся рефлектограммы обратного рассеяния. Величина мертвой зоны зависит от длительности импульса, длины волны, коэффициента обратного рассеяния, коэффициента отражения и полосы пропускания приемника.

Пространственная разрешающая способность

Пространственная разрешающая способность характеризует способность рефлектометра обнаружить два соседних события, одно из которых может быть отражательным.

При рефлектометрических измерениях всегда есть компромисс между дальностью и разрешающей способностью. При относительно малых расстояниях тестирования желательно снижать динамический диапазон, расширяя полосу пропускания предусилителя рефлектометра. При этом повышается разрешающая способность и точность измерения расстояния. На больших расстояниях, напротив, целесообразно использовать меньшую полосу пропускания, а также использовать алгоритмы усреднения.

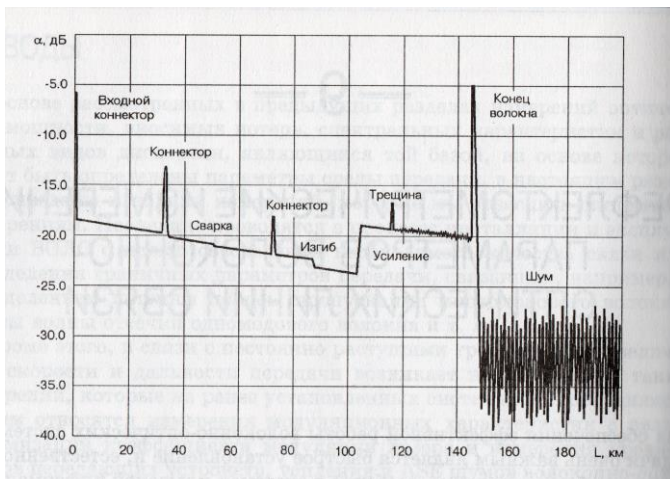


Рис.3.3. Типичная рефлектограмма рефлектометра на рэлеевском рассеянии..

Показания рефлектометра изменяются пропорционально логарифму отношения мощностей импульса света рассеянных в начале линии и на расстоянии z . При двухстороннем анализе рефлектограмм (он проводится для того, чтобы исключить ошибки, вызванные флуктуациями диаметра модового пятна волокна) необходимо, чтобы число сростков волокон и их положение на рефлектограммах, измеренных с двух сторон линии, было одинаковым.

3.3. Контроль за состоянием оптического кабеля методом бриллюэновской рефлектометрии

Принцип работы рефлектометра на бриллюэновском рассеянии.

Эффект бриллюэновского рассеяния используется в оптических рефлектометрах, так как позволяет находить участки с повышенным механическим напряжением.

Известно, что при распространении по световоду мощных оптических импульсов с шириной спектра порядка нескольких сот МГц начинает проявляться бриллюэновское рассеяние. В результате этого возбуждается гиперзвуковая волна – акустические фононы. Собственно бриллюэновский частотный сдвиг составляет величину 13 ГГц (для кварца) при ширине спектральной линии до 50 МГц. Однако, вследствие эффекта Доплера, возникающего при излучении колебаний движущимся источником, этот спектр претерпевает уширение, величина которого пропорциональна скорости движения. При нормальном (ненапряженном) состоянии кварца акустические фононы движутся со скоростью примерно 5 км/с. При растяжении или сжатии волокна плотность изменяется. Вследствие этого меняется скорость акустических фононов, на которых происходит рассеяние оптического излучения, и, как следствие, изменяется степень уширения оптического спектра бриллюэновского рассеяния. Этот фактор позволяет использовать его для контроля состояния оптического волокна в кабеле в действующей линии.

Бриллюэновское рассеяние представляет собой неупругое рассеяние света на акустических фононах, в результате чего генерируется стоксова волна, распространяющаяся во встречном направлении. При этом частота последней уменьшается на величину бриллюэновского сдвига f , зависящего от длины волны подаваемого сигнала λ и составляющего около 11 ГГц в области $\lambda = 1550$ нм для световодов на основе кварцевого стекла. Величина сдвига при малых относительных деформациях ε и постоянной температуре может быть найдена по формуле:

$$f = 2Vn / \lambda + K\varepsilon = f_0 + K\varepsilon \quad (3.1)$$

где n – эффективный показатель преломления среды; V – скорость звука; λ – длина волны света в вакууме; f_0 – смещение частоты в отсутствие натяжения волокна; $K = \text{const.}$ В

соответствии с (3.1) бриллюэновский сдвиг частоты пропорционален натяжению оптического волокна, что позволяет оценить механические нагрузки в волокне.

При значительном увеличении натяжений и относительных деформаций зависимость $f=f(\varepsilon)$ может значительно отклоняться от линейной, что является одним из проявлений нелинейных эффектов в волоконной оптике. В этом случае, следуя аддитивному подходу в нелинейной оптике, вместо (4.1) получаем следующую зависимость:

$$f = f_0 + \Delta f(\varepsilon). \quad (3.2)$$

Нелинейная добавка $\Delta f(\varepsilon)$ определяется конкретными свойствами волокна и используемого зондирующего излучения, а само уравнение (4.2) изучается главным образом экспериментально.

3.4. Рефлектометр на ВКР-рассеянии

Эффект ВКР используется в оптических рефлектометрах. Особенность этих рефлектометров – возможность измерять температуру волоконных световодов.

Принцип работы рефлектометра на ВКР-рассеянии.

Возможность измерения температуры световода по характеристикам рамановского рассеяния основана на соотношении между интенсивностями антистоксовой и стоксовой компонент:

$$\frac{I_{AC}}{I_C} = \left[\frac{\lambda_C}{\lambda_{AC}} \right]^4 \exp\left(-\frac{hcv}{kT}\right) \quad (3.3)$$

где I_{AC} и I_C – интенсивность антистоксовой и стоксовой компонент; λ_{AC} и λ_C – длина волны антистоксовой и стоксовой компонент; ν – разность волновых чисел падающего излучения и стоксовой (антистоксовой) компоненты; T – абсолютная температура световода; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; c – скорость света в вакууме.

Выражение (3.3) показывает, что при увеличении температуры световода отношение интенсивностей компонент рамановского рассеяния увеличивается; происходит это прежде всего из-за роста антистоксовой компоненты. Для стандартных одномодовых волокон и диапазона длин волн, используемого в волоконно-оптической связи, изменение отношения I_{AC}/I_C составляет примерно 0,8%/К.

Одним из самых распространенных методов диагностики состояния волоконного световода является метод импульсной рефлектометрии: в световод вводится зондирующий оптический импульс, регистрируется непрерывный сигнал обратного рассеяния и анализируется зависимость его интенсивности от времени. Как было указано выше, в спектре этого сигнала всегда есть рэлеевская компонента (ее параметры не зависят от температуры световода) и компоненты рамановского рассеяния. Для определения температуры световода необходимо выделить их из общего сигнала.

Вследствие больших длин волоконных световодов в линиях связи, для проведения измерений целесообразно использовать длины волн в диапазоне 1550–1625 нм, на которых затухание минимально. Но тогда длина волны стоксовой компоненты становится больше 1650 нм, потери в волокне значительно возрастают, чувствительность приемной аппаратуры падает, и регистрация компоненты возможна только на коротких расстояниях. Вследствие этого для измерения температуры световода может использоваться только антистоксова компонента в соответствии с выражением:

$$I_{AC} \sim [\exp(hcv/(kT)) - 1]^{-1} \quad (3.4)$$

Величина I_{AC} зависит не только от температуры волокна, но и от обычного затухания, поэтому необходимо разделить их влияние. Это можно сделать, если измерить сигналы рэлеевского рассеяния на длинах волн зондирующего импульса и антистоксовой компоненты. Изменение их интенсивности определяется только обычным затуханием в световоде. Таким образом удается выделить из антистоксового сигнала вклад, который вносит именно изменение температуры.