

3. МЕТОД ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

3.1. Назначение и область применения

- Контроль состояния оптических волокон (ОВ), выявление, определение характера и поиск дефектов ОВ.
- Измерение затухания ОВ на строительных длинах оптических кабелей (ОК), на отдельных участках волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), на длине регенерационного участка (РУ), на стыках ОВ.
 - Измерение коэффициента затухания ОВ.
 - Измерение расстояний до мест соединений ОВ и оценки качества стыков.
 - Измерение характеристики обратного рассеяния ОВ и привязки ее к трассе прокладки ОК при паспортизации РУ ВОЛП.

Метод обратного рассеяния применяется на всех этапах строительства и эксплуатации ВОЛП:

- При входном контроле.
- В процессе монтажа муфт ОК.
- При приемо-сдаточных измерениях и паспортизации РУ ВОЛП.
 - Для непрерывного контроля состояния ОВ в процессе эксплуатации ВОЛП.
 - При выполнении измерений в процессе аварийно-восстановительных работ (АВР).
 - Для поиска мест повреждений.

3.2. Основные положения

В основе метода лежит явление обратного Рэлеевского рассеяния.

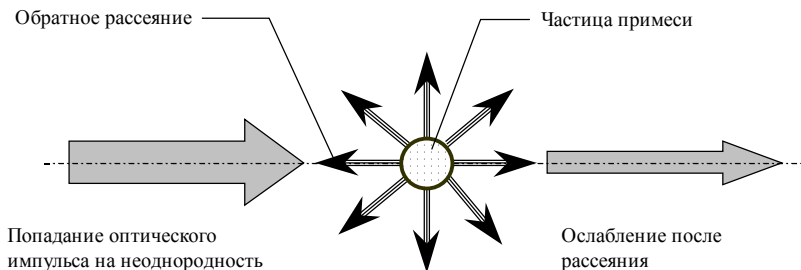


Рисунок 3.1. Формирование потока обратного рассеяния

Основные факторы формирования потока обратного Рэлеевского рассеяния:

- флуктуации показателя преломления сердцевины вдоль волокна;
- отражения от рассеянных и локальных неоднородностей.

Мощность обратно рассеянного потока $P_S(t)$, измеренная в точке ввода оптических импульсов в ОВ с некоторой задержкой t относительно момента посылки зондирующего импульса, определяется мощностью обратного рассеяния в точке ОВ, расположенной на расстоянии от места измерения, равно:

$$x = \frac{v_g \cdot t}{2} \quad (3.1)$$

где v_g – групповая скорость распространения оптического импульса.

$$v_g = \frac{c}{n_g}, \quad (3.2)$$

c – скорость света;

n_g – групповой показатель преломления.

В первом приближении мощность обратно рассеянного потока $P_s(t)$ равна

$$P_s(t) = \frac{P_0 \cdot \Delta t \cdot S \cdot a_d}{2} \exp(-\alpha \cdot v_g t), \quad (3.3)$$

где P_0 – максимальное (пиковое) значение амплитуды зондирующего импульса в точке ввода;

Δt – длительность зондирующего импульса;

S, a_d – параметры Рэлеевского рассеяния.

α – коэффициент затухания оптического волокна дБ/км;

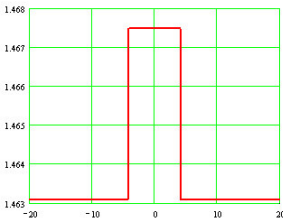
v_g – групповая скорость.

S – параметр обратного Рэлеевского рассеяния, равный отношению обратно рассеянной мощности в некоторой точке ОВ ко всей рассеянной мощности в этой точке:

$$S = \frac{P_S(x_i)}{\sum_{j=0}^i P_S(x_{N-j})}$$

Параметр S определяется свойствами ОВ (форма профиля, апертура и пр.).

Пример: ступенчатый профиль показателя преломления:



MM ОВ

SM ОВ

$$S = \frac{NA^2}{4n_1^2}$$

$$S = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{n_1 w^2}$$

a_d – параметр Рэлеевского рассеяния, равный отношению мощности, рассеянной в некоторой точке ОВ, к падающей оптической мощности в эту же точку:

$$a_d = \frac{P_S(x_i)}{P(x_i)}$$

Мощность обратного рассеяния прямо пропорциональна параметрам зондирующего импульса на вводе ОВ P_0 и Δt , параметрам ОВ a_d и S и экспоненциально зависит от затухания α и групповой скорости v_g ОВ. В свою очередь, v_g обратно пропорциональна групповому показателю преломления ОВ.

Часто используется понятие коэффициент обратного рассеяния k :

$$k = \frac{1}{2} S a_d. \quad (3.4)$$

Тогда мощность потока обратного рассеяния определяется по формуле:

$$P_s(t) = k \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot \exp(-\alpha v_g t) \quad (3.5)$$

Таким образом, зависимость уровня мощности обратного рассеяния от времени $p_s(t)$ – линейная.

$$p_s(t) = 10 \cdot \log[P_s(t)] = C - \alpha x \quad (3.5)$$

и разность уровней обратно рассеянной мощности, измеренных на ближнем конце в моменты времени t_1 и t_2 , есть затухание ОВ на соответствующем участке линии.

$$p_s(t_1) - p_s(t_2) = \alpha(x_2 - x_1) = a_{12} \quad (3.6)$$

где

$$x_1 = \frac{v_g t_1}{2}, \quad x_2 = \frac{v_g t_2}{2} \quad (3.7)$$

Коэффициент обратного рассеяния k изменяется вдоль волокна случайным образом:

- флуктуации показателя преломления
- флуктуации геометрических параметров ОВ

Т.е. на однородных участках (участках, не содержащих макро неоднородности – соединения, микротрещины сердцевины, изгибы, радиус которых меньше допустимого) волокно является квазирегулярным

В этом случае реальная зависимость $p_s(t)$ флуктуирует около некоторой прямой, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс непосредственно равен коэффициенту затухания волокна α .

При наличии в линии неоднородностей, отражающих свет, образуется поток Френелевского отражения. Измеренная на ближнем конце мощность $P_F(x_i)$ оптического излучения, отраженного в некоторой точке x_i , равна:

$$\begin{aligned} P_{Fi}(t) &= c \cdot P_0 \cdot \Delta t \cdot \exp(-2\alpha x_i) & t_i \leq t \leq t_i + \Delta t \\ P_{Fi}(t) &= 0 & t_i + \Delta t < t \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $t_i = \frac{x_i}{2v_g}$;

x_i - расстояние до неоднородности;

Мощность потока Френелевского отражения на ближнем конце можно рассматривать как сумму:

$$P_F(t) = \sum_{i=1}^m P_{Fi}(t), \quad (3.9)$$

где m - количество неоднородностей на участке.

Коэффициент отражения, как правило, на несколько порядков больше коэффициента обратного рассеяния. Соответственно, в моменты времени

$$t_i \leq t \leq t_i + \Delta t \quad (3.10)$$

мощность потока обратного рассеяния пренебрежимо мала, по сравнению с мощностью потока отражения.

Очевидно, что, измеряя мощность обратного потока оптического излучения, поступающего на ближний конец ОВ, и анализируя ее изменения, можно получить оценки параметров исследуемой ВОЛП.

Измерения характеристик ОВ методом обратного рассеяния являются *косвенными*.

Искомая величина определяется в результате математической обработки результатов измерения мощности обратного потока оптического излучения.

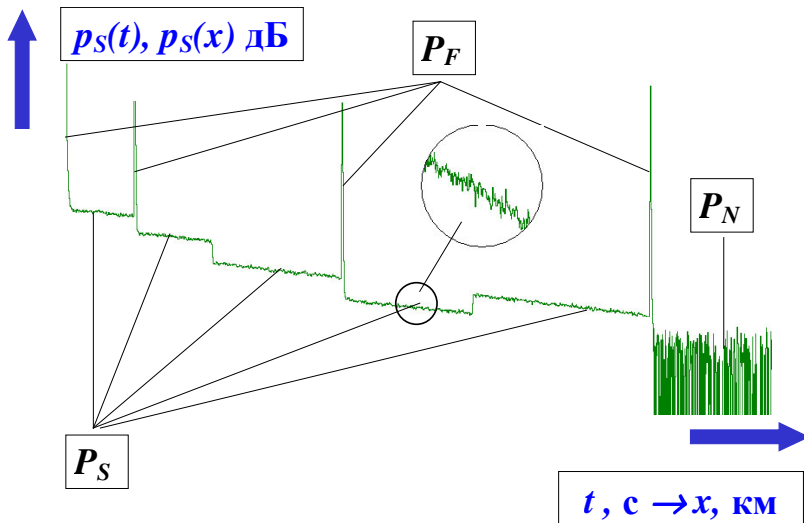
Причем характеристики распространения оптического сигнала в прямом направлении определяют по изменениям мощности излучения распространяющегося в обратном направлении.

При этом предполагается, что параметры ОВ в прямом и обратном направлении идентичны.

Очевидно, что это условие выполняется с определенной погрешностью.

В общем случае измеряемую на ближнем конце ОВ мощность обратного потока можно представить в виде суммы мощностей обратно рассеянного потока, отраженного потока и мощности шума:

$$P(t) = P_S(t) + P_F(t) + P_N(t) \quad (3.11)$$



Мощность шума есть случайная функция, обусловленная совокупностью факторов.

Ряд составляющих шума не зависит от уровня мощности передаваемого оптического сигнала.

К ним относятся:

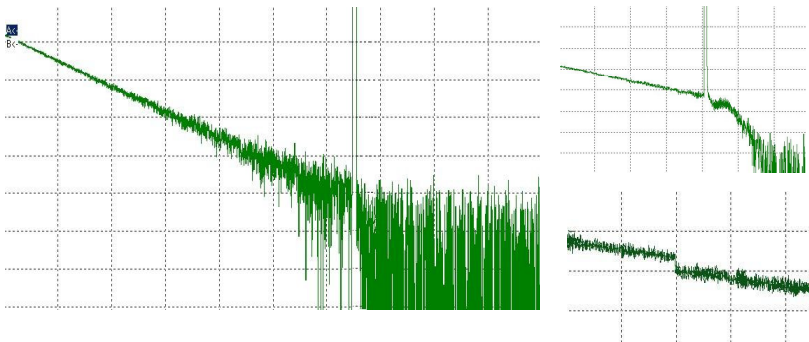
- тепловые шумы фотоприемника
- собственные шумы лазера.

Другие составляющие шума связаны с мощностью передаваемого сигнала:

- дробовой шум фотоприемника
- модовый шум
- шумы, обусловленные взаимодействием лазера с нерегулярным волокном

Результирующая мощность шума соизмерима с мощностью обратно рассеянного потока. Это величины одного порядка.

Поэтому одна из основных проблем реализации метода обратного рассеяния – выделение полезного сигнала на фоне высокого уровня помех.



Известны следующие способы реализации метода обратного рассеяния:

- **OCWR** (Optical Continuous-Wave Reflectometry) – метод обратного рассеяния на основе непрерывного излучения
- **OCDR** (Optical Coherence Domain Reflectometry) – интерферометрический метод обратного рассеяния
- **COTDR** (Correlation Optical Time Domain Reflectometry) – корреляционная рефлектометрия.
- **OFDR** (Optical Frequency Domain Reflectometry) – метод обратного рассеяния в частотной области.
- **OTDR** (Optical Time Domain Reflectometry) – метод обратного рассеяния во временной области.

Оптические рефлектометры обратного рассеяния (**OTDR – Optical Time Domain Reflectometer**), реализующие метод обратного рассеяния во временной области, являются основными средствами измерений при строительстве и эксплуатации ВОЛП.



В OTDR мощность принимаемого сигнала ограничена мощностью зондирующего импульса, которая пропорциональна его максимальному значению и длительности.

Это вынуждает в процессе работы искать компромисс между динамическим диапазоном, определяющим дальность действия, и разрешающей способностью, обеспечивающей оптимальное решение измерительной задачи.

Вместе с тем, данный способ реализации метода обратного рассеяния позволяет получать приемлемые результаты с удовлетворительным быстродействием.

Это и обеспечило широкое внедрение реализующих его средств измерений.

На сетях связи в основном нашли применение только **OTDR** и определители места обрыва волокна – **FF** (Fault Finder), работающие во временной области.

Перечисленные приборы являются основными средствами измерений для строительства и эксплуатации ВОЛП.