

Учебный курс
«ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Тема :

**Волоконно-оптические технологии и
техника**

Лектор:

кфмн, доцент Гришачев Владимир Васильевич

Программа курса

ЛЕКЦИИ

- I. Фотонные технологии
- II. Волоконно-оптический транспорт
- III. Волоконно-оптические преобразователи
- IV. Волоконно-оптическая техника
- V. Рефлектометрия оптических волокон**
- VI. Коллоквиум
- VII. Лабораторный практикум

Лекция 9-10

«Рефлектометрия оптических волокон»

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности.
2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования.
3. Характеристика рефлектометрии по физическим принципам отклика на зондирование.
4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации.
5. Системы мониторинга оптических сетей методами рефлектометрии.
6. Оптическая рефлектометрия в измерительных системах.

Рефлектометрия оптических волокон

○ Понятие

рефлектометрические методы используются в измерительной технике

— для зондирования через свободное пространство

сонары (sonar, акустическое зондирование водной среды)

содары (sodar, акустическое зондирование атмосферы)

радары (radar, электромагнитное зондирование сред)

лидары (lidar, оптическое зондирование сред)

— для зондирования волноводных структур

рефлектометры электрического кабеля

рефлектометры оптического кабеля

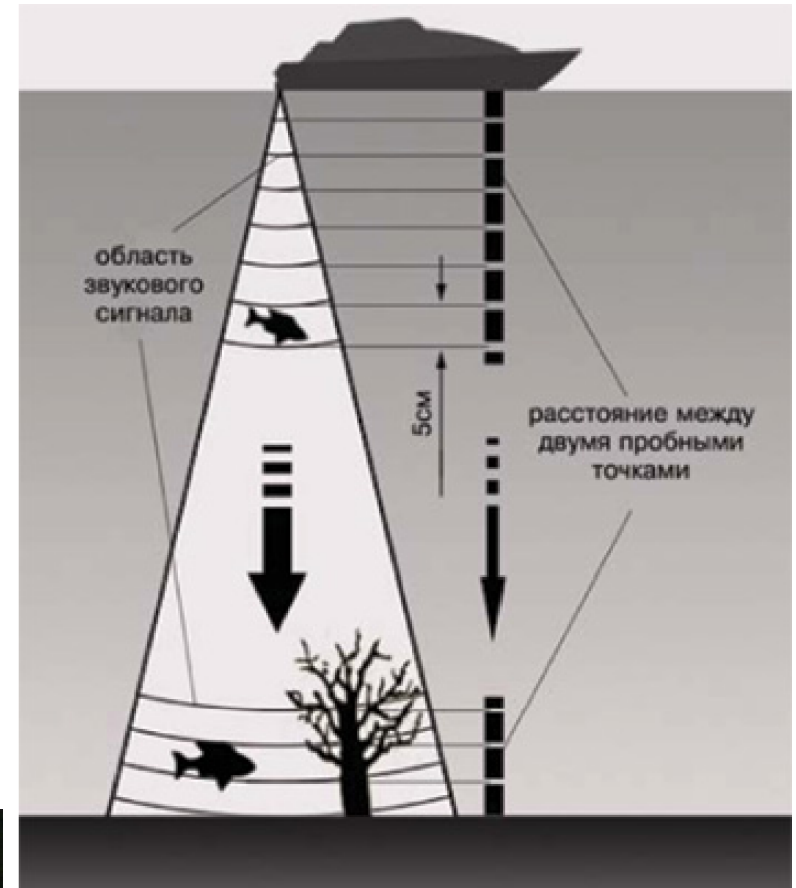
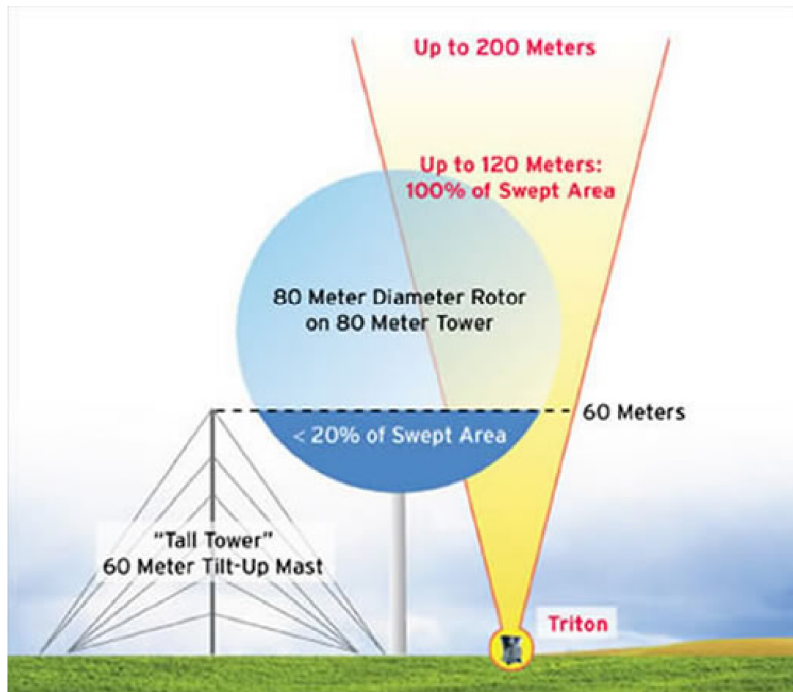
основной принцип рефлектометрии – посыл импульса поля в открытое пространство или в волновод и последующая регистрация возвращаемого сигнала, несущего информацию об объектах на пути импульса поля.

Рефлектометрия оптических волокон

○ **Понятие: сонары, содары**

акустическое зондирование атмосферы (содар), водной среды земли (сонар) и любых упругих сред с целью получения измерительной информации об их состоянии – положение неоднородностей, состав, плотность, размеры

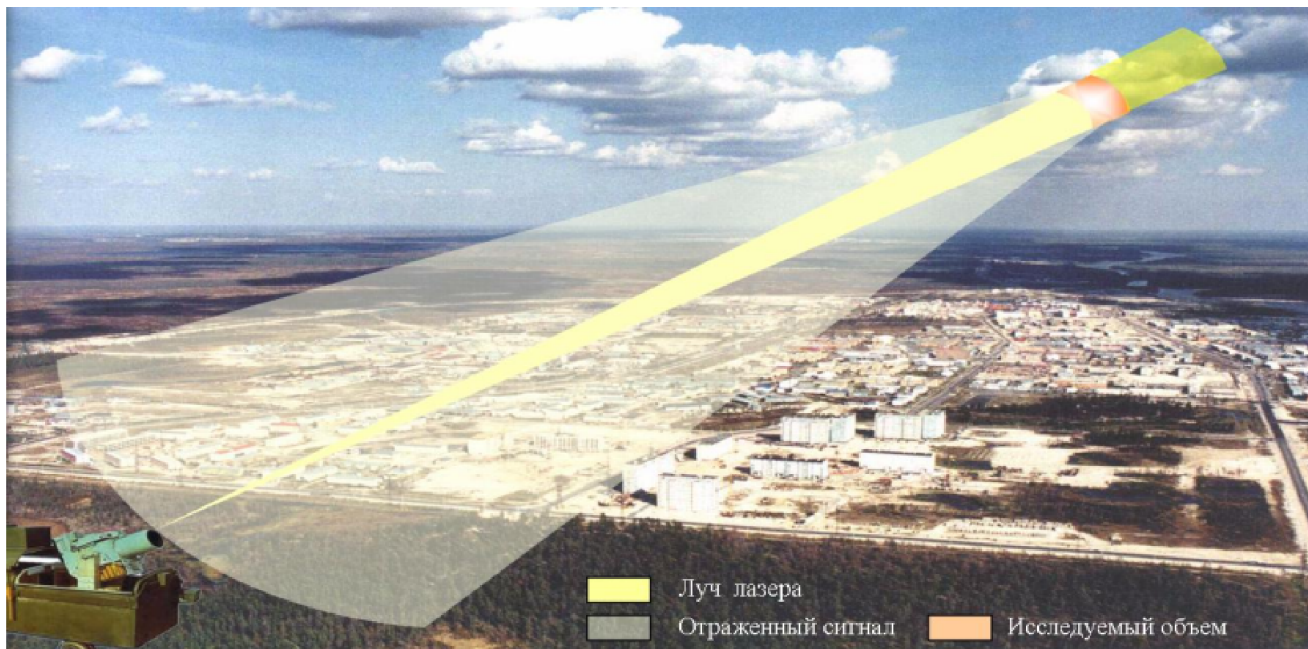
и др.



Рефлектометрия оптических волокон

○ **Понятие: лидары**

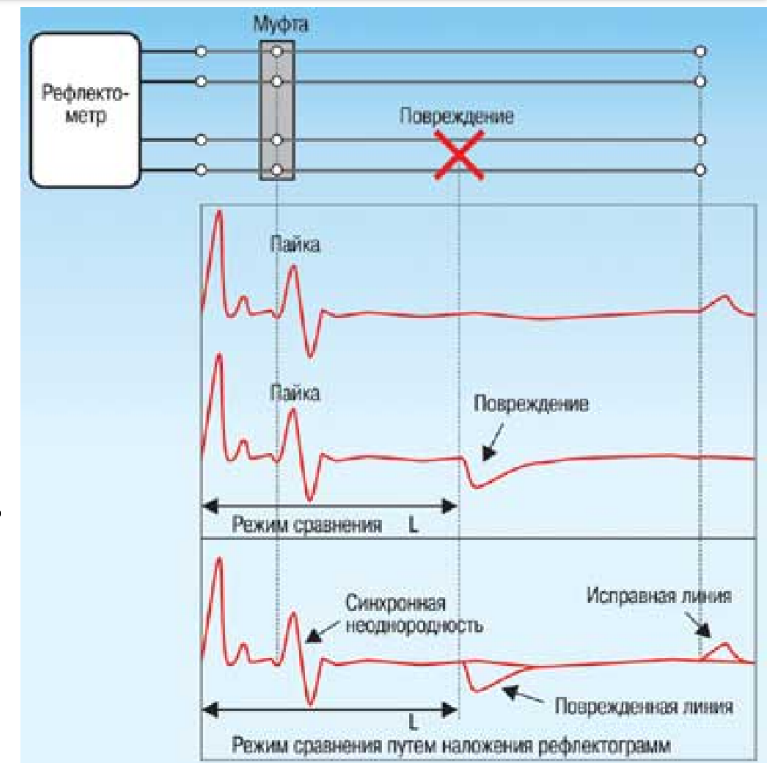
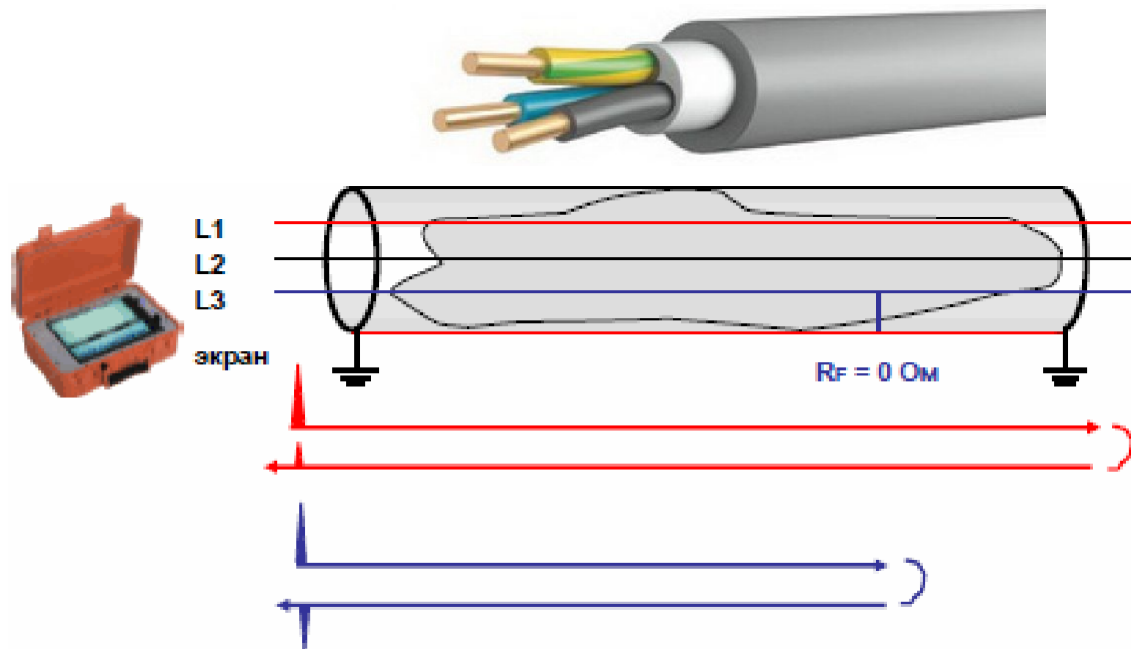
лазерное зондирование атмосферы с целью получения измерительной информации о состоянии атмосферы – примеси, состав, облачность и др., а так же с целью определения положения объектов исследования



Рефлектометрия оптических волокон

○ Понятие: рефлектометры электрического кабеля

зондирование электромагнитными импульсами электрических волноводов – медных кабелей, СВЧ волноводов и других структур с целью получения измерительной информации об их состоянии – положение неоднородностей, состав, электрические параметры, размеры и др.



1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ **Понятие рефлектометрии волокон**

зондирование волокон оптическим излучением и регистрация распределенного во времени оптического отклика, которое позволяет совместить источник и приемник излучения с системой обработки и локализовать по волокну место отклика среды на внешнее воздействие;

прохождение оптического излучения через волокно сопровождается процессами поглощения, рассеяния на малых неоднородностях, отражением от границ раздела сред с различными оптическими параметрами, переизлучением (люминесценцией) на примесях внутри волновода, часть которого возвращается в направлении обратном зондирующему излучению;

параметры возвращаемого излучения определяются

- параметрами зондирующего излучения (мощностью, частотой, фазой, поляризацией);
- свойствами зондируемой оптической среды (поглощением, рассеянием, отражением и т.д.);

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

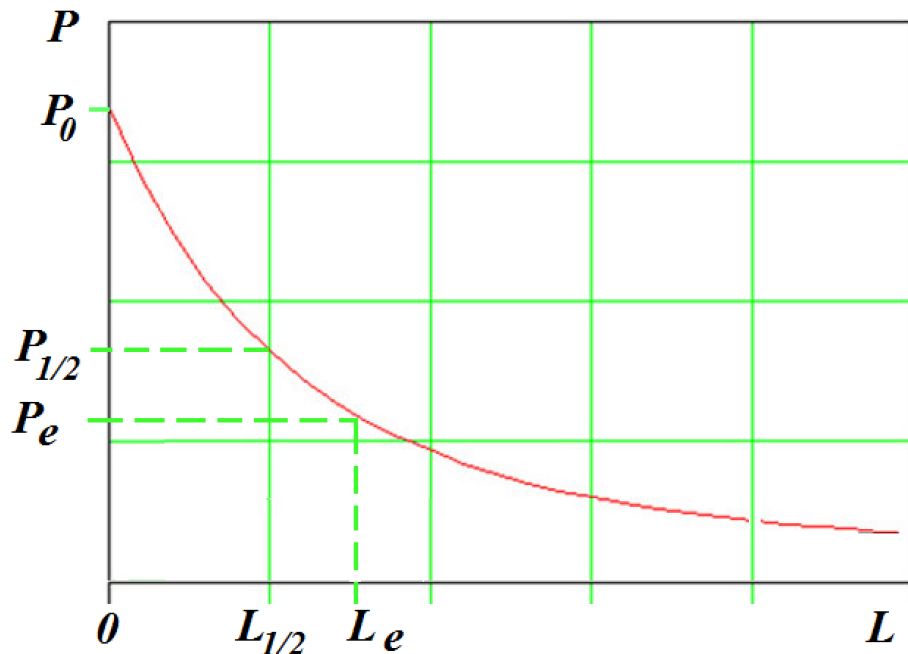
○ Понятие рефлектометрии волокон

при прохождении оптического излучения по волокну происходит его ослабление, которое характеризуется показателем затухания (attenuation) α :

$$\alpha = \alpha_{ab} + \alpha_{sc} + \alpha_{rf} \quad 1/m$$

связанное с поглощением (absorption) α_{ab} , рассеянием (scattering) α_{sc} и отражением (reflection) α_{rf} ;

показатель преломления изменяется по длине оптического волокна, так что ослабление светового потока происходит по закону Бугера-Ламберта-Бера



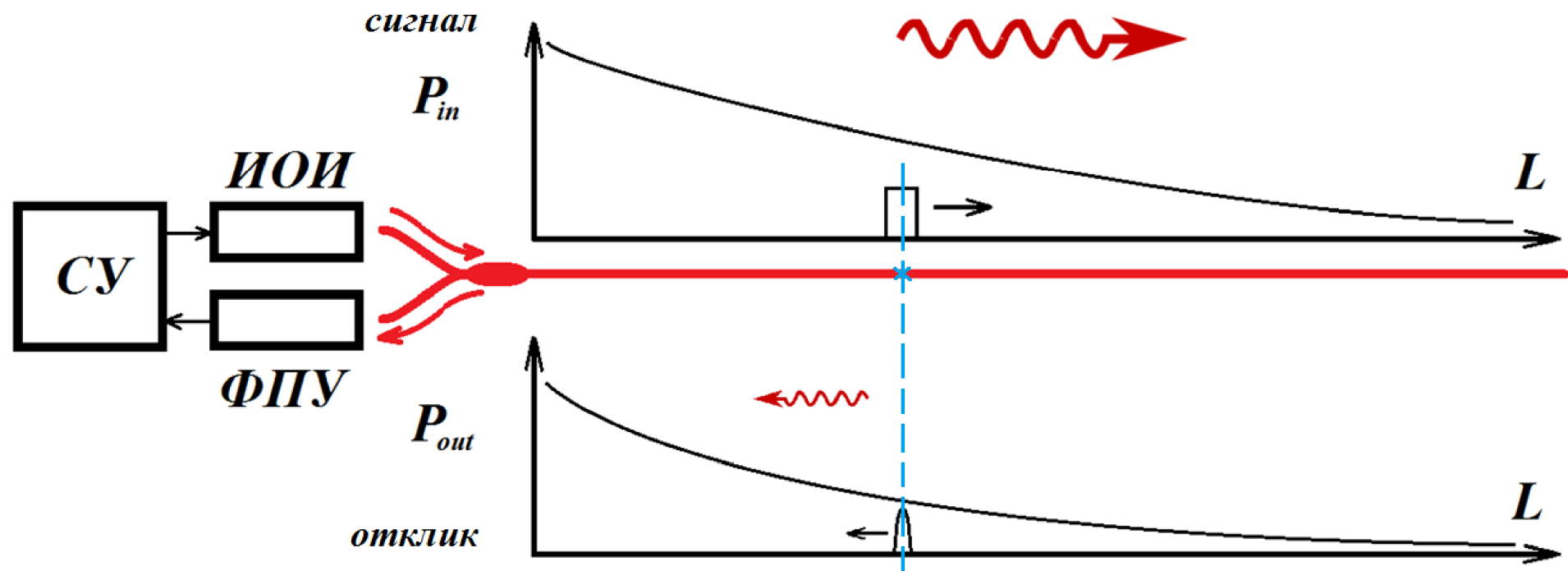
$$P_L = P_0 \exp\left(-\int_0^L \alpha(l) dl\right) = P_0 \exp(-\alpha L)$$

$$L_{1/2} : P_{1/2} = \frac{P_0}{2} \quad L_e : P_e = \frac{P_0}{e}$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{L}\right) \int_0^L \alpha(l) dl$$

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ Оптическая схема рефлектометрии волокон



зондирующий сигнал P_{in} от ИОИ (источника оптического излучения) в каждой точке волокна L формирует отклик P_{out} , следующий в обратном направлении и регистрируется в ФПУ (фотоприемном устройстве), СУ (система управления) регистрирует сигнал отклика с задержкой по времени t , так что

$$L = ct/2n$$

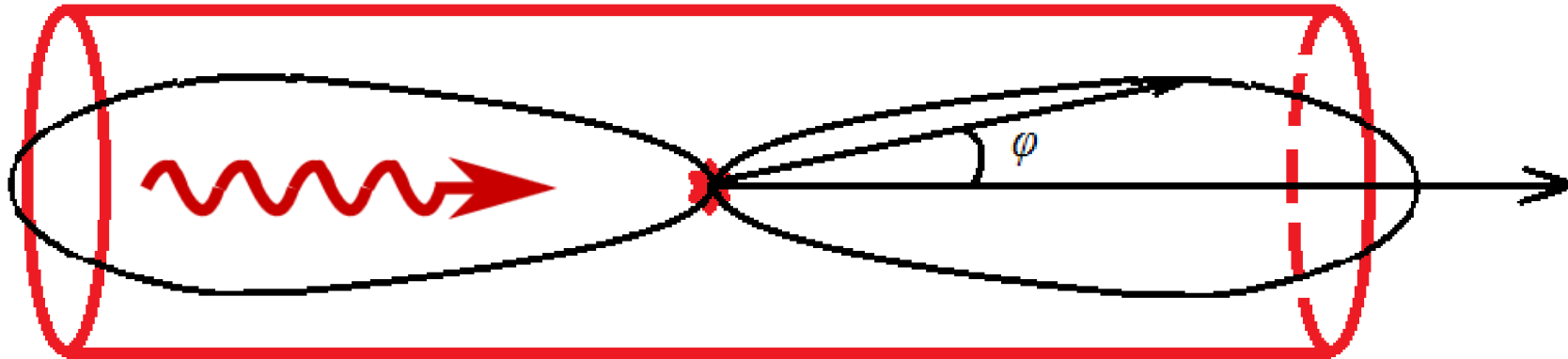
c – скорость света, n – показатель преломления среды

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ Физические принципы рефлектометрии волокон

$$k = \frac{1}{q} \left(\frac{NA}{n} \right)^2$$

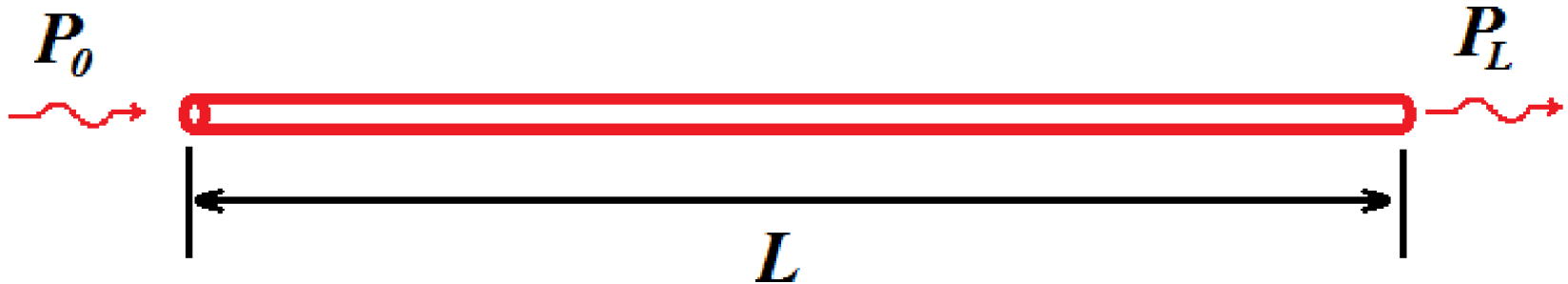
$$P_{defect}(\varphi) \sim (1 + \cos^2 \varphi) / 2$$



зондирующий сигнал претерпевает рэлеевское рассеяние на локальных дефектах волокна, диаграмма направленности которого имеет характерный вид восьмерки вытянутой вдоль направления распространения, поэтому только часть $k < 1$ рассеянного света направлена в противоположную сторону и захватывается (канализируется) волокном, которое зависит от числовой апертуры (NA), показателя преломления (n) и некоторого числового коэффициента q равного 4 для градиентного многомодового волокна и равный 4,55 для ступенчатого одномодового волокна.

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ Физические принципы рефлектометрии волокон



оптическое волокно длиной L с оптической мощностью на входе P_0 и на выходе P_L , в результате рассеяния и других потерь $P_0 > P_L$, т.е. мощность ослабевает, а потери равны

α - показатель затухания

$$P_s = P_0 - P_L = P_0 [1 - \exp(-\alpha L)] \quad P_s \approx P_0 \alpha L$$

можно принять $\alpha L \ll 1$

обратно рассеивается

$$P_{bs} = kP_0 [1 - \exp(-\alpha L)] \approx kP_0 \alpha L$$

следовательно для показателя затухания

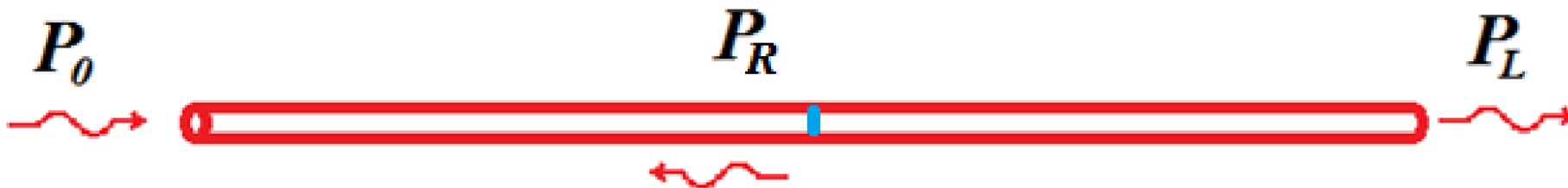
$$\alpha = \frac{1}{k} \cdot \frac{P_{bs}}{2P_0 L} \left(\frac{1}{km} \right)$$

$$\alpha_s = 4,343 \cdot \alpha \left(\frac{dB}{km} \right)$$

$\frac{1}{2}$ - появляется из-за двойного прохода участка обратного излучения

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ Физические принципы рефлектометрии волокон



в оптическом волокне с оптической мощностью на входе P_0 и на выходе P_L , в результате отражения на дефектах потери будут определяться формулами Френеля, так что обратно отразится мощность P_R ,

n_1 – показатель преломления сердцевины

n_0 – показатель преломления дефекта

(например, при контакте волокон - воздуха)

т.е. мощность прошедшего излучения ослабевает $P_0 > P_L$, и такие потери также влияют на показатель затухания в волокне;

потери на отдельном дефекте составят

$$R = \frac{P_R}{P_0} = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

$$\beta = 10 \cdot \lg R \approx 20 \cdot \lg (\Delta/2) \quad \Delta = n_1 - n_0/n_1$$

1. Принципы оптической рефлектометрии и её возможности

○ Классификация методов рефлектометрии волокон

A. по параметрам отклика зондируемой среды

- амплитудные
- фазовые
- спектральные
- поляризационный

B. по параметрам зондирующего излучения

- непрерывные
- импульсные
- частотные

C. по параметрам системы регистрации и обработки

- когерентный/некогерентный
- корреляционный
- режим счета фотонов

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ **Понятие**

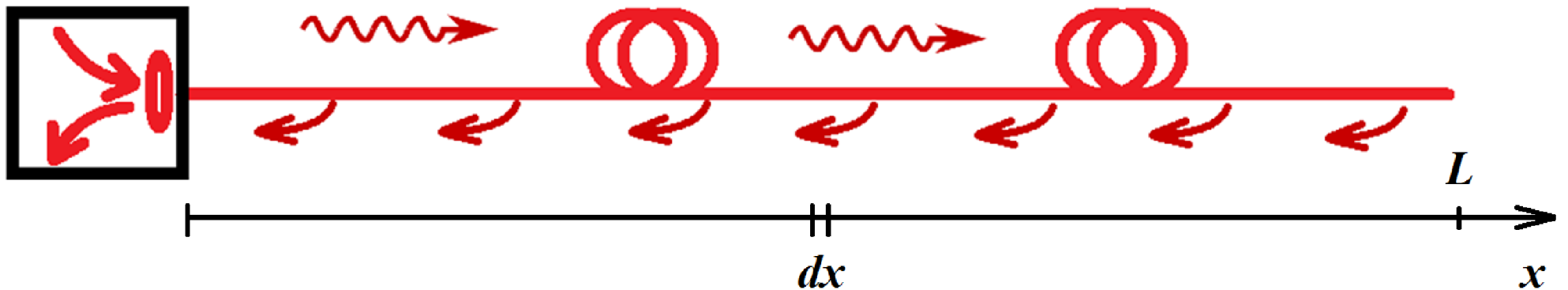
основное преимущество оптической рефлектометрии состоит в возможности локализовать отклик среды на внешний световое излучение, этого можно достичь различными способами модуляции зондирующего излучения

- зондирование оптическим излучением постоянной мощности и состава;
- во временной области – зондирующее оптическое излучение имеет импульсное представление во времени, так что отдельный импульс формирует отклик среды при его прохождении волокна, пока не затухнет, после чего следует следующий импульс, поэтому приходящее в данный момент излучение имеет локализацию по длине импульса;
- в частотной области – со временем в течение фиксированного периода плавно меняется частота оптического излучения при постоянной мощности излучения, таким образом в данный момент времени в приемник приходит излучение разных длин волн и с разных участком волокна, следовательно при разложении отклика в спектр получаем, что каждой длине волны отвечает свой участок волокна.

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Непрерывная рефлектометрия

(Optical Continuous Wave Reflectometer, OCWR) – непрерывное оптическое излучение направляется в оптическое волокно и регистрируется возвратные излучения, формируемые в результате рэлеевского рассеяния и френелевских отражений на локальных оптических неоднородностях; $P(x) = P_0 \exp(-\alpha x)$



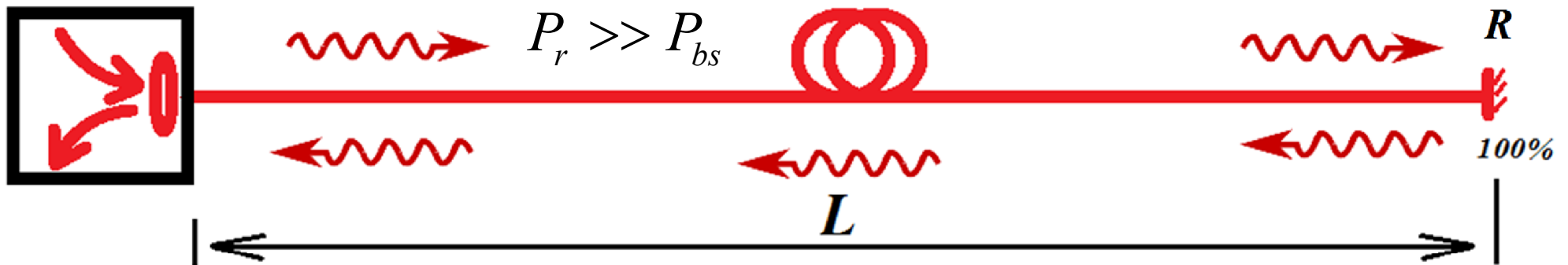
$$dP_{bs} = kP(x)\alpha dx \quad P_{bs} = \int_0^L k\alpha P_0 \exp(2\alpha x) dx = \frac{k}{2} P_0 [1 - \exp(-\alpha 2L)]$$

$$\langle \alpha \rangle = -\frac{1}{2L} \ln \left(1 - \frac{2P_{bs}}{kP_0} \right); \quad m^{-1} \quad \langle k \rangle = \frac{2P_{bs}}{P_0}; \quad L \rightarrow \infty$$

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Непрерывная рефлектометрия

измерение возвратных потерь (Optical Return Loss, ORL) – непрерывное оптическое излучение направляется в оптическое волокно на конце которого размещается зеркало с отражением R ($=100\%$) и регистрируется излучение отраженное от конца волокна с зеркалом, которое затухает при прохождении оптического волокна в прямом и обратном направлениях;



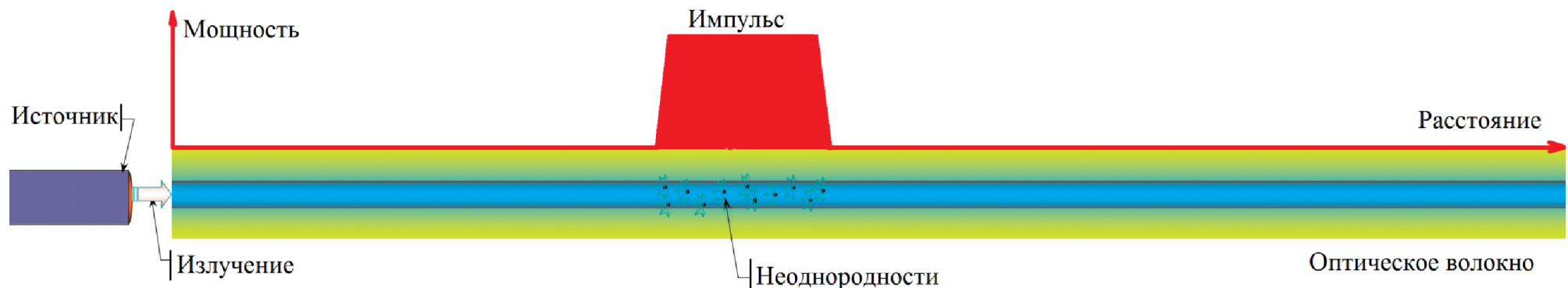
$$P_r = P_0 \exp(-2\alpha L); \quad R = 100\% \quad \langle \alpha \rangle = -\frac{1}{2L} \ln\left(\frac{P_r}{P_0}\right); \quad m^{-1}$$

$$P_r = RP_0 \exp(-2\alpha L); \quad R < 100\% \quad R = \frac{P_r}{P_0} \exp(2\alpha L)$$

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: принципы

оптическая рефлектометрия во временной области (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) состоит в зондирование волокна оптическими импульсами и регистрации обратно возвращаемого излучения



при прохождении одиночного оптического импульса происходит рэлеевское рассеяние, френелевское отражение, поглощение и другие эффекты связанными со свойствами оптического волокна, которые формируют обратное возвращающееся излучение со свойствами:

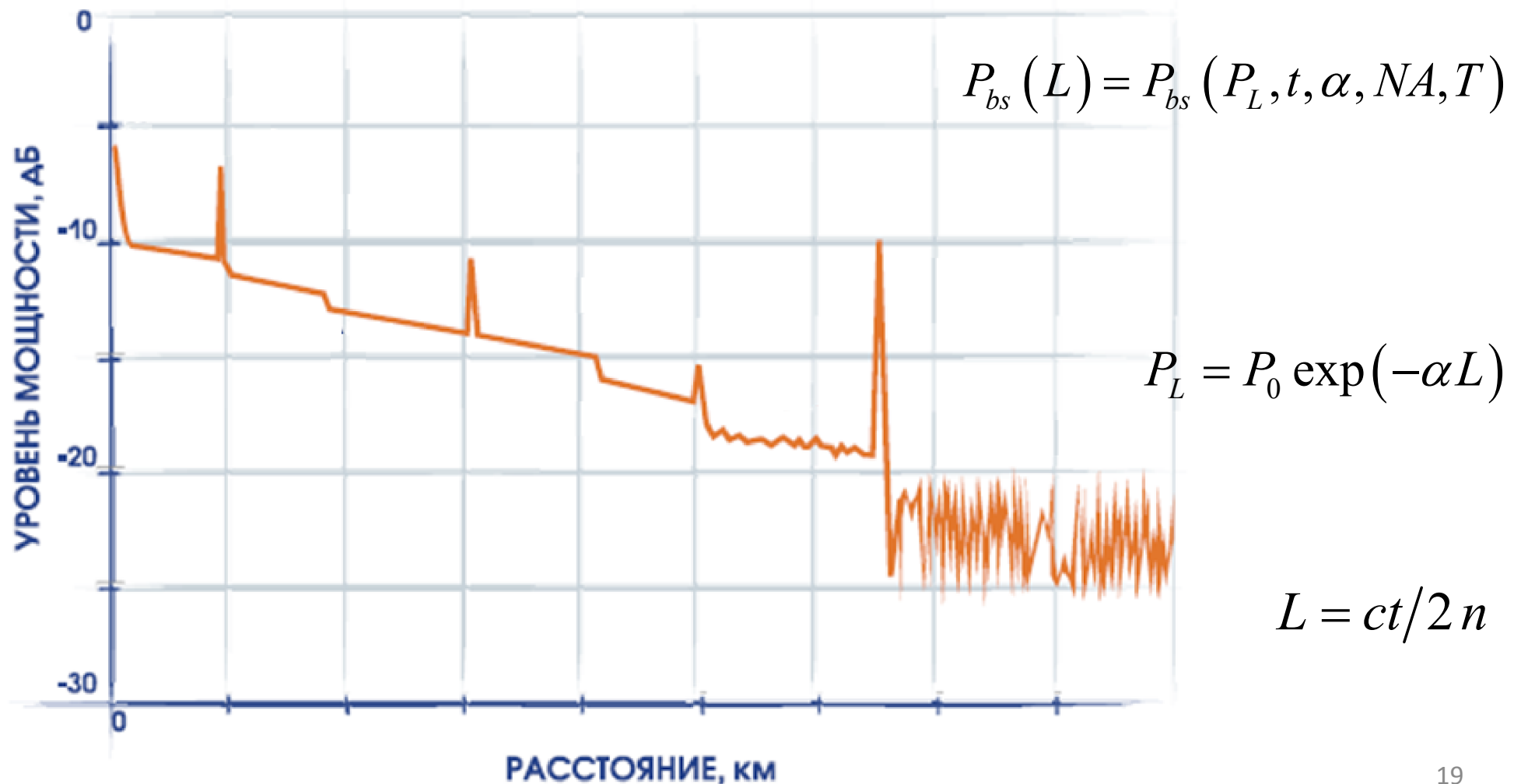
мощность отклика волокна падает вместе с убыванием мощности зондирующего импульса, т.е. с пройденным расстоянием;

отдельные неоднородности формируют всплески мощности отклика;

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: рефлектограмма

результатирующий отклик, представляемый в виде зависимости уровня мощности обратного излучения от расстояния по волокну



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

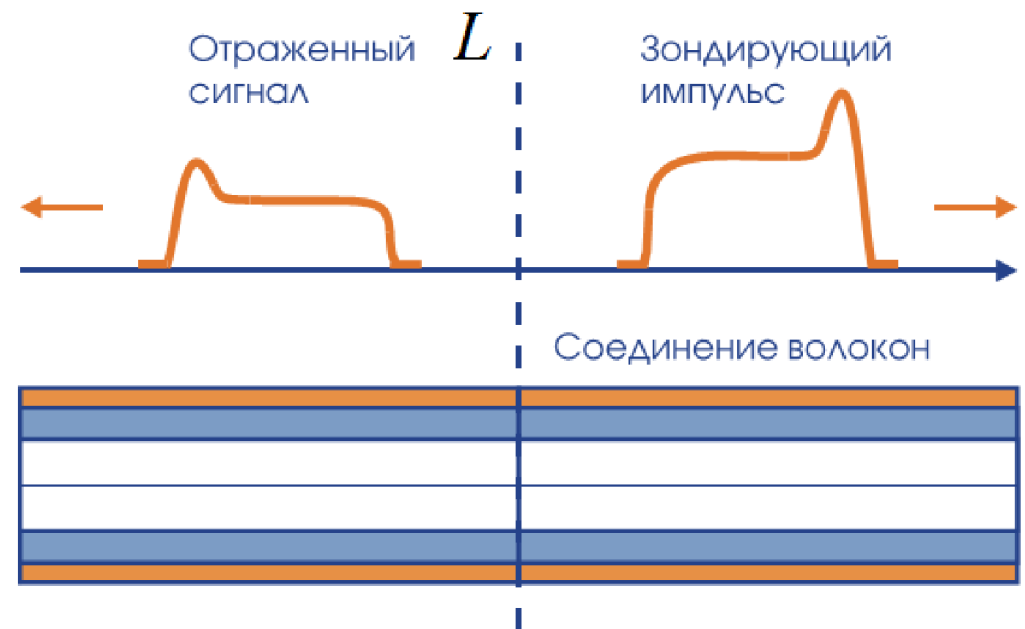
○ Импульсная рефлектометрия: рефлектограмма

результатирующий отклик, представляемый в виде зависимости уровня мощности обратного излучения от расстояния по волокну
оптическая мощность зондирующего оптического импульса на расстоянии L

$$P_L = P_0 \exp(-\alpha L)$$

$$L = ct/2n$$

формирование отклика в виде отраженного сигнала от локальной неоднородности малой длины, форма сигнала повторяет форму зондирующего импульса



$$P_{bs}(L) = P_{bs}(P_L, t, \alpha, NA, T)$$

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: рефлектограмма

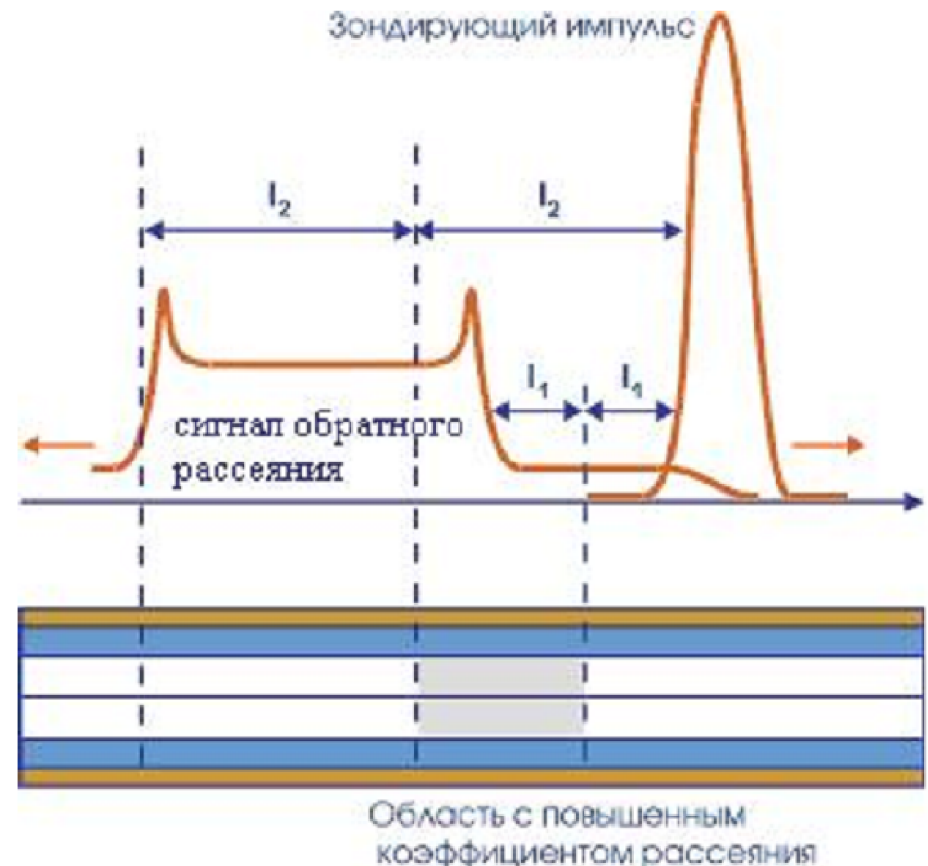
результатирующий отклик, представляемый в виде зависимости уровня мощности обратного излучения от расстояния по волокну

оптическая мощность зондирующего оптического импульса на расстоянии L

$$P_L = P_0 \exp(-\alpha L) \quad L = ct/2n$$

формирование обратно рассеянного сигнала от нелокальной рассеивающей области, длительность сигнала равна удвоенной длительности зондирующего импульса

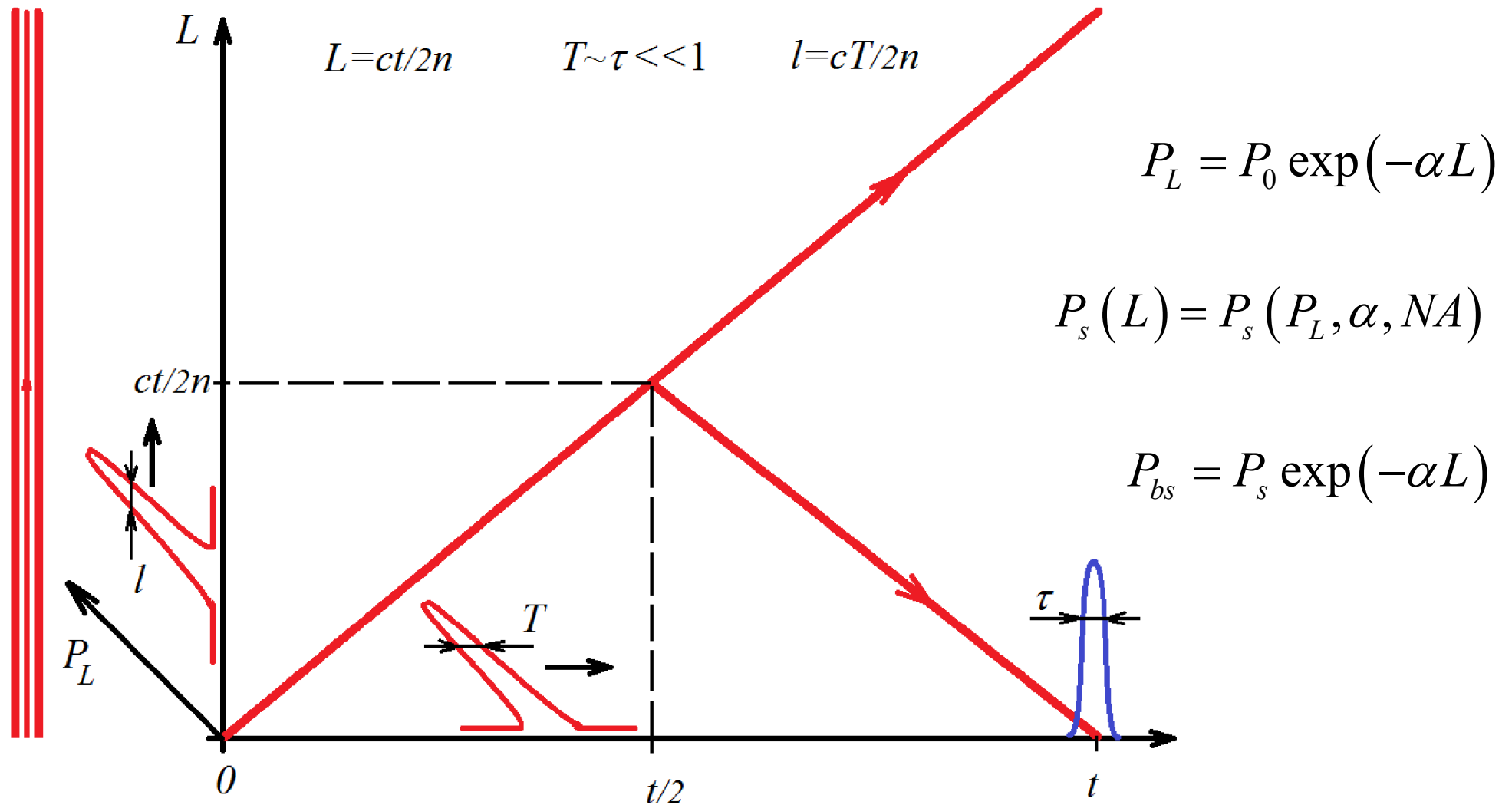
$$P_{bs}(L) = P_{bs}(P_L, t, \alpha, NA, T)$$



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: формирование рефлектограмма

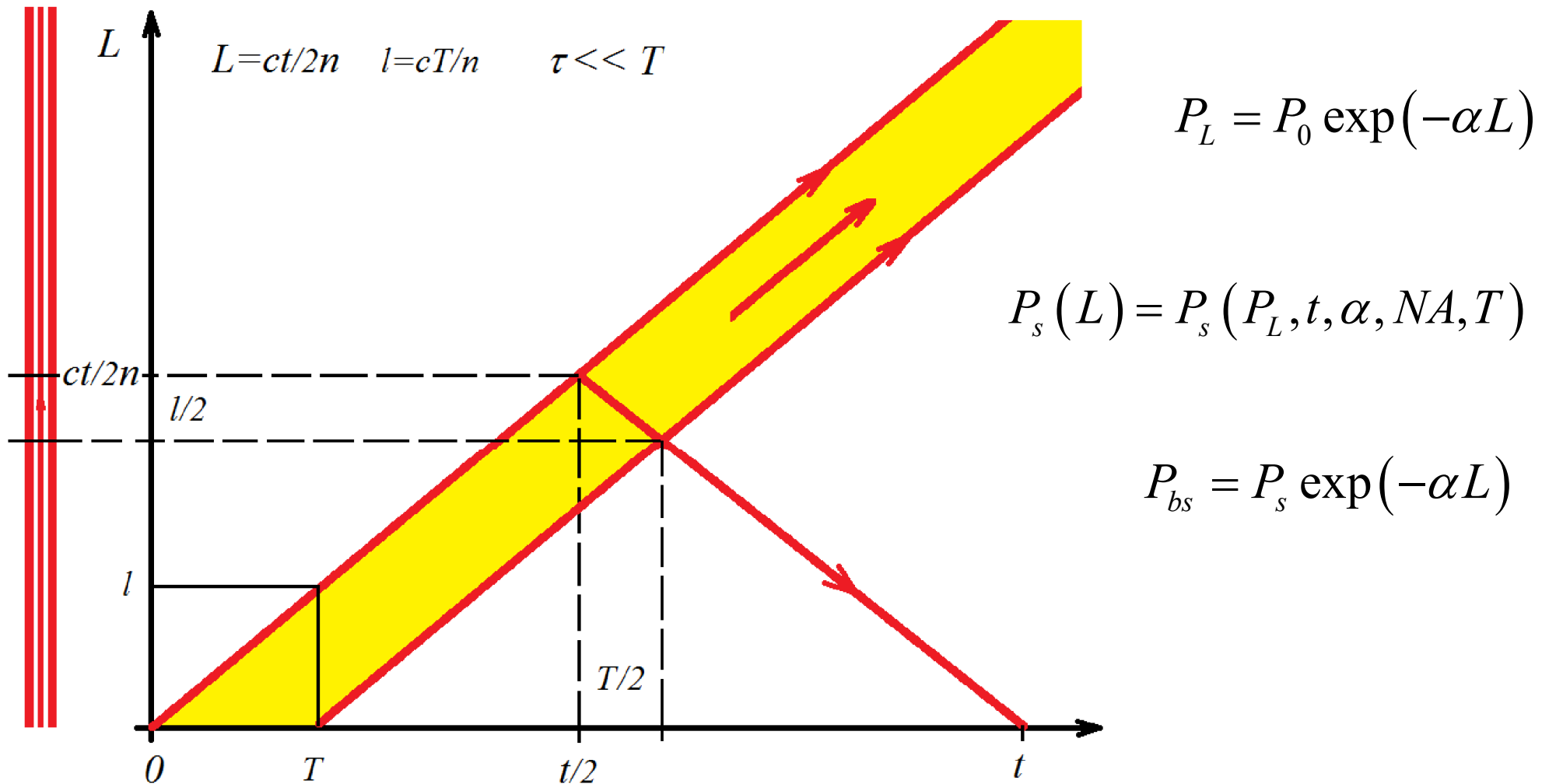
зондирующий импульс длительности T (l) и постоянная времени τ ФПУ



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: формирование рефлектограмма

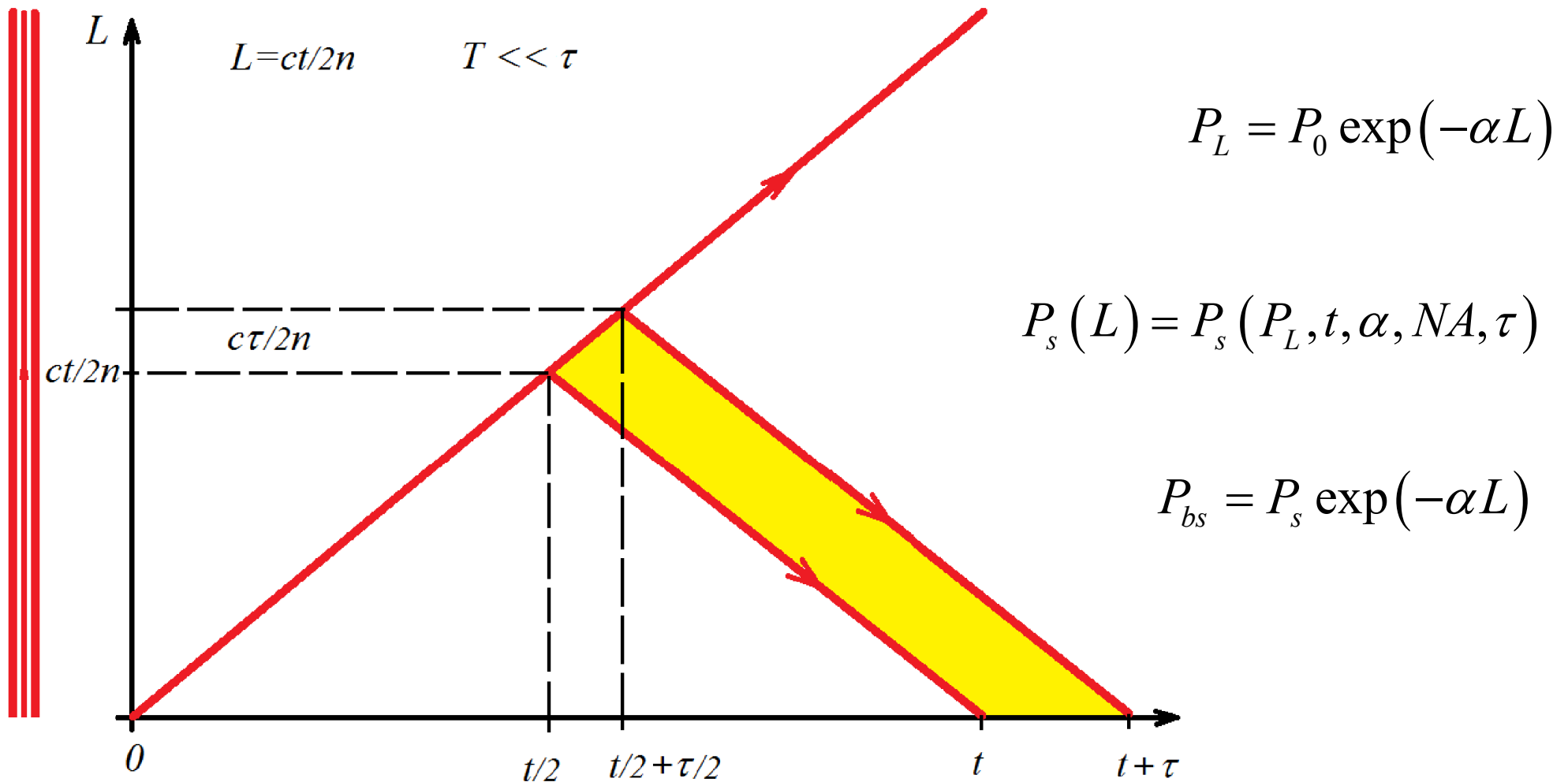
зондирующий импульс длительности T и постоянная времени τ ФПУ



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: формирование рефлектограмма

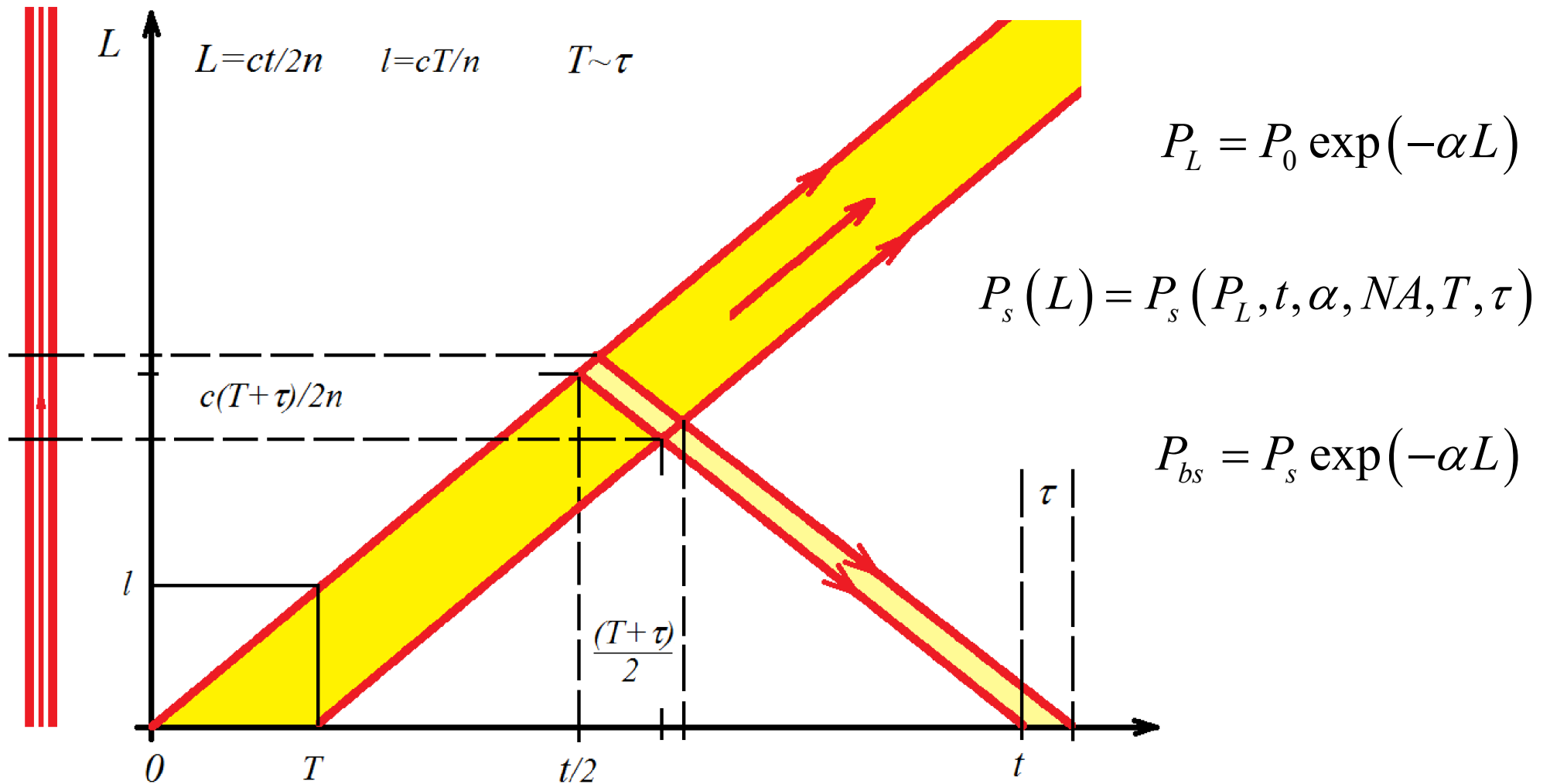
зондирующий импульс длительности T и постоянная времени τ ФПУ



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: формирование рефлектограмма

зондирующий импульс длительности T и постоянная времени τ ФПУ



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

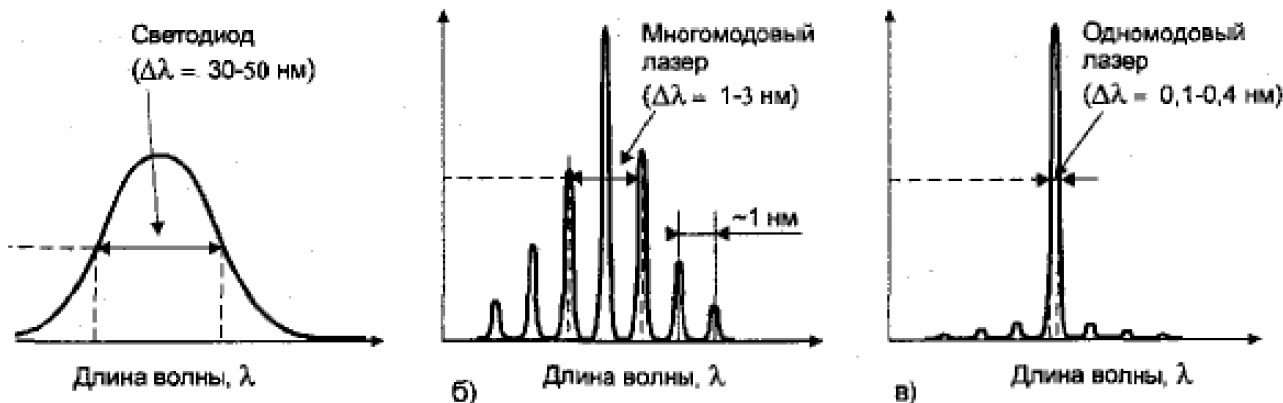
○ Импульсная рефлектометрия: общие характеристики

источник оптического излучения

- оптическая мощность источника P_0 ;
- длительность зондирующего импульса T
- энергия зондирующего импульса W_p равному интегралу от мощности P_0 по длительности импульса от t до $t+T$

$$W_p = \int_t^{t+T} P_0 dt \approx P_0 T$$

- спектральный состав оптического излучения – центральная длина волны λ , ширина спектра $\Delta\lambda$, форма спектральной линии



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: общие характеристики

фотоприемное устройство

- постоянная времени фотоприемника $\tau=1/\Delta f$, величина обратная ширине полосы частот пропускания Δf ;
- динамический диапазон приемника;
- эквивалентной мощностью шума P_{NEP} (Noise Equivalent Power, NEP), т.е. среднеквадратичная мощность флуктуаций оптического излучения на входе идеального (нешумящего) приемника, создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника, тогда минимальная регистрируемая оптическая энергия

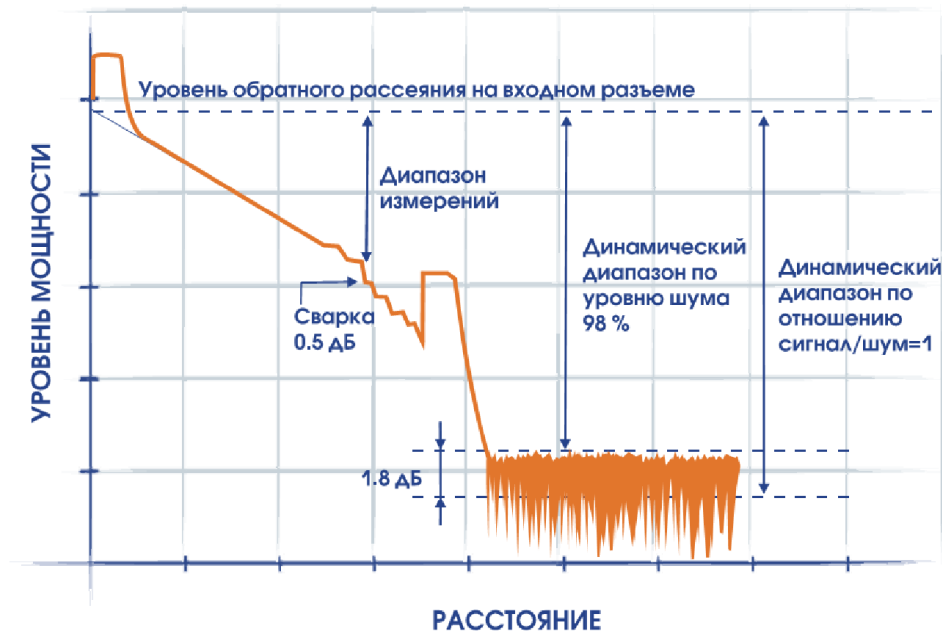
$$\min [W_p] = SNR \cdot P_{NEP} \tau$$

SNR требуемое отношение среднеквадратичных мощностей сигнала и шума;

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

динамический диапазон рефлектометра D_r по потоку обратно рассеянной мощности – в дБ разность между уровнем обратного рассеяния на ближнем конце волокна и верхним уровнем среднего значения шума у конца волокна или после него



динамический диапазон зависит как от полной импульсной мощности лазерного источника света так и от чувствительности измерителя, так что очень мощный источник света и чувствительный измеритель обеспечат большой динамический диапазон и наоборот.

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

по динамическому диапазону оптического рефлектометра можно определить максимальную длину волокна, которой он может проводить измерения

$$\max [L] = \frac{\max [D_r]}{\alpha}$$

например, определим значение максимальной дальности измерений в отношении одномодового кабеля с помощью оптического рефлектометра, имеющего динамический диапазон $D_r = 40 \text{ dB}$, на длине волны $\lambda = 1310 \text{ нм}$ типовое значение потерь в данном волокне $\alpha = 0.35 \text{ dB/км}$.

$$L_0 = \frac{40 \text{ dB}}{0.35 \text{ dB / km}} = 114 \text{ km}$$

Следовательно формирование протяженной рефлектограммы требует, чтобы зондирующий импульс был достаточно мощным для достижения конца тестируемого волокна и возвращения обратно, а фотоприемник обладал достаточно высокой чувствительностью для регистрации слабых сигналов обратного рассеяния, поступающих с конца длинного отрезка волокна;

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

мертвая зона по затуханию и по событию – это участки вблизи отражающих элементов, в которых затруднены измерения, вследствие превышения локальных отражаемых мощностей над рассеиваемой обратной мощностью:

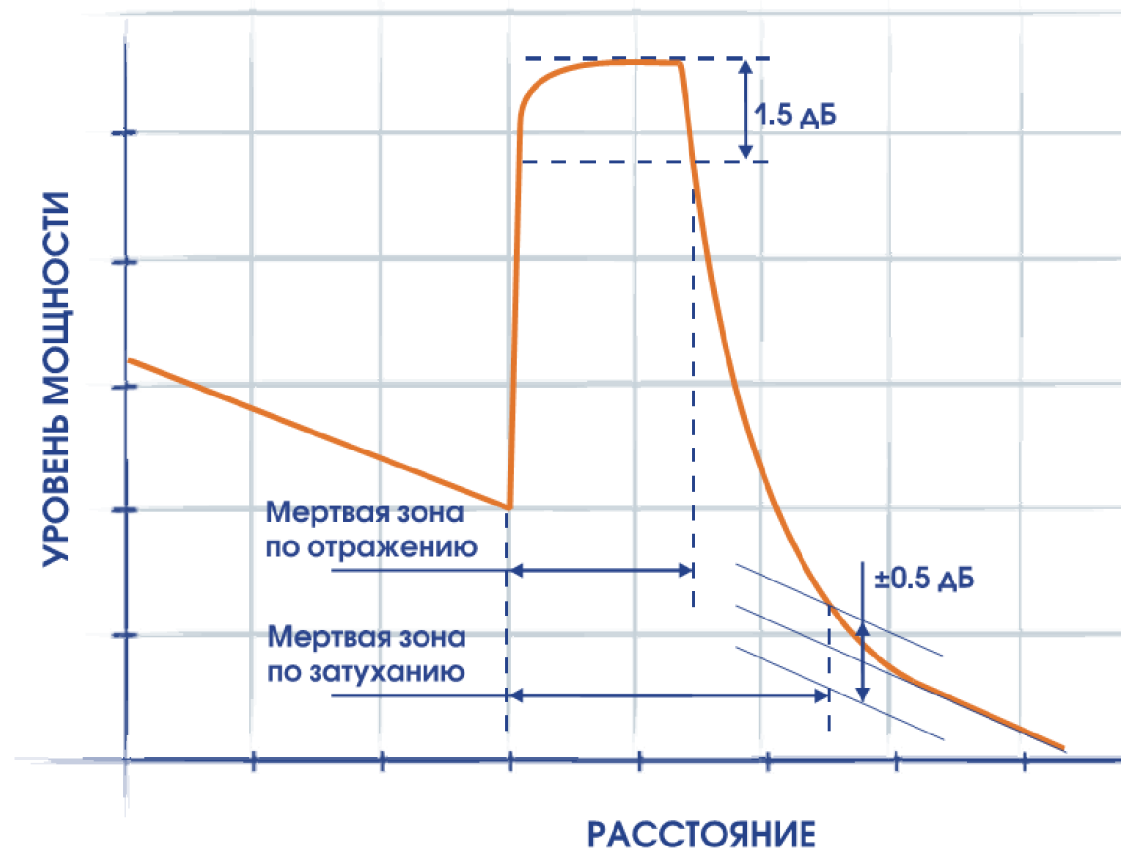
- область вблизи отражающего события, в пределах которой невозможно обнаружить другое отражающее событие, называется мертвой зоной отражения;
- область вблизи отражающего события, в пределах которой невозможно точно измерить уровень мощности обратного рассеяния называется мертвой зоной затухания, т.к. этот участок волокна исключается из процесса измерения затухания.

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

— 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;



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

разрешающая способность измерения по расстоянию (пространственная) характеризует возможность с помощью рефлектометра различить два события.

- 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);
- для оценки величины разрешающей способности одиночного отражающего события можно использовать приближенное выражение

$$\Delta L = \frac{c}{2n} \sqrt{T^2 + \tau^2}$$

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

точность измерения по расстоянию (пространственная) характеризуется величиной абсолютной и относительной погрешности измерения расстояния, точность измерения расстояния связана

- с точностью внутренних часов (задающего генератора) рефлектометра;
- с ошибками определения показателя преломления;
- с точностью дискретизации АЦП;
- с ошибками локализации, определяемыми неточностью определения положения события из-за наличия шумов и тесно связана с пространственной разрешающей способностью рефлектометра;

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: параметры

точность измерения потерь (затухания) определяется

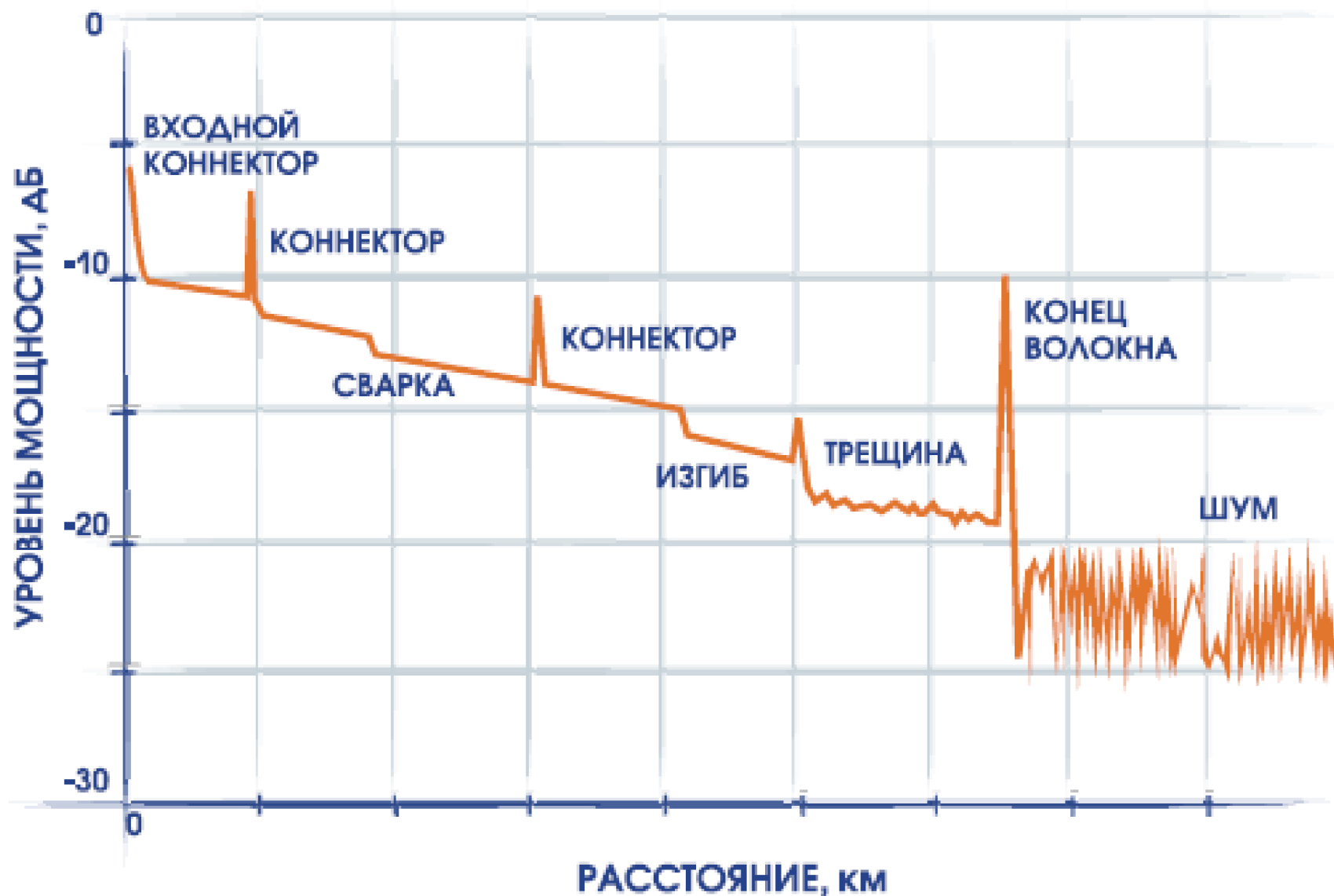
- ошибками измерения мощности сигнала обратного рассеяния;
- шумами преобразователя и случайными ошибками измерителя,
- нелинейностями характеристик фотоприемника и измерителя;

ошибку измерений затухания характеризуют линейностью рефлектометра LN [дБ/дБ], равной отношению абсолютной разности ΔA (в дБ) измеренного и действительного к самому действительному значению затухания A (в дБ):

$$LN = \frac{\Delta A [dB]}{A [dB]}$$

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: расшифровка рефлектограммы

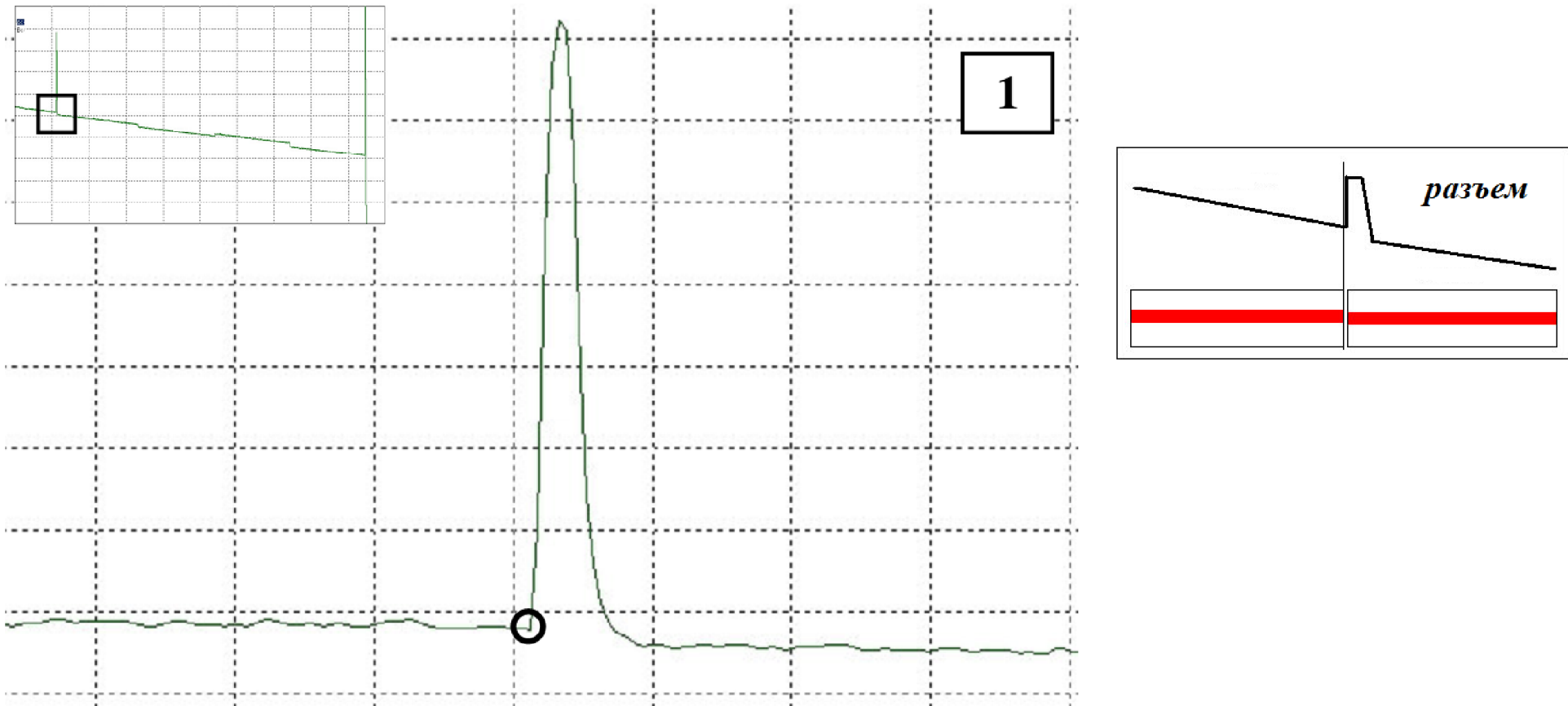


2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: расшифровка отдельных событий

отражающие события:

разъемное соединение волокон

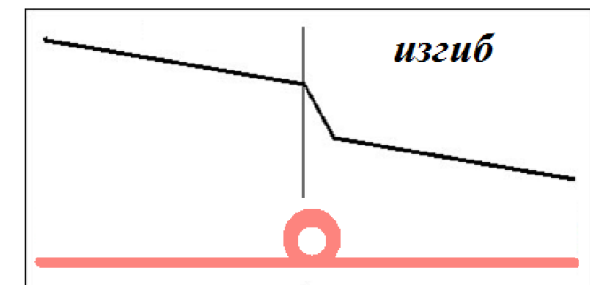
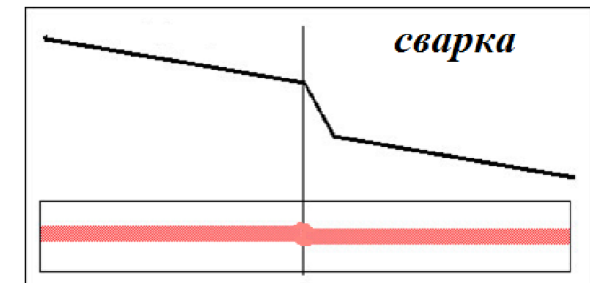


2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: расшифровка отдельных событий

неотражающие события (ступенька вниз):

сварное соединение волокон,
изгиб волокна с радиусом меньше критического

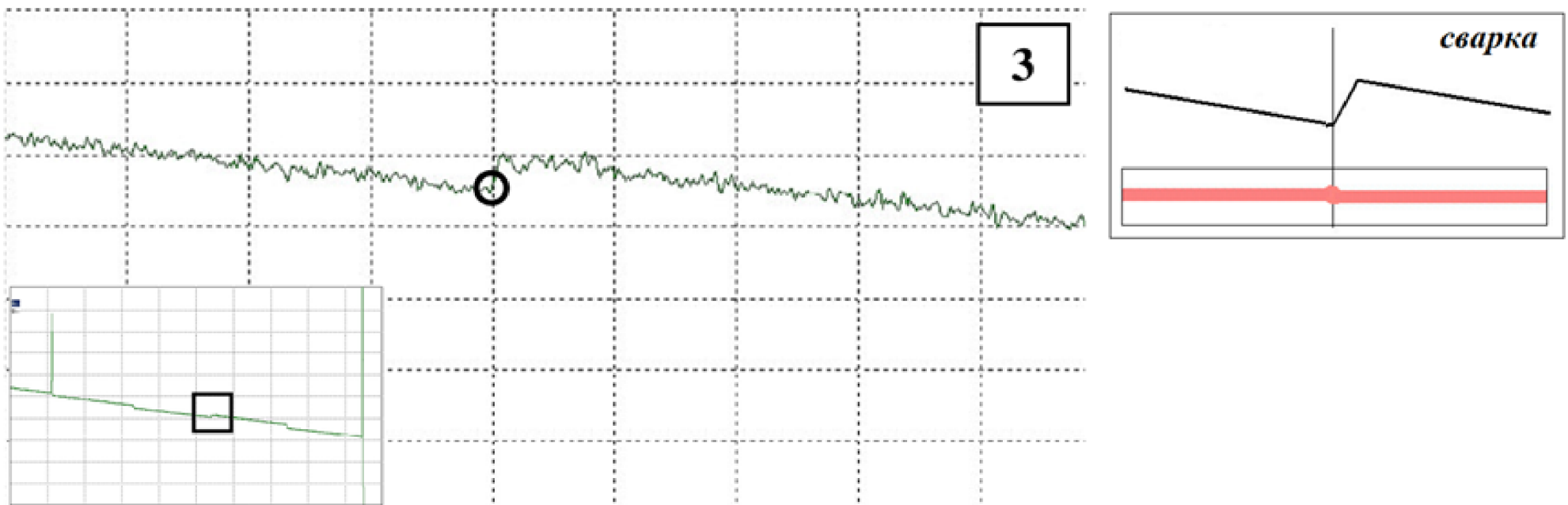


2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: расшифровка отдельных событий

неотражающие события (ступенька вверх):

сварное соединение волокон

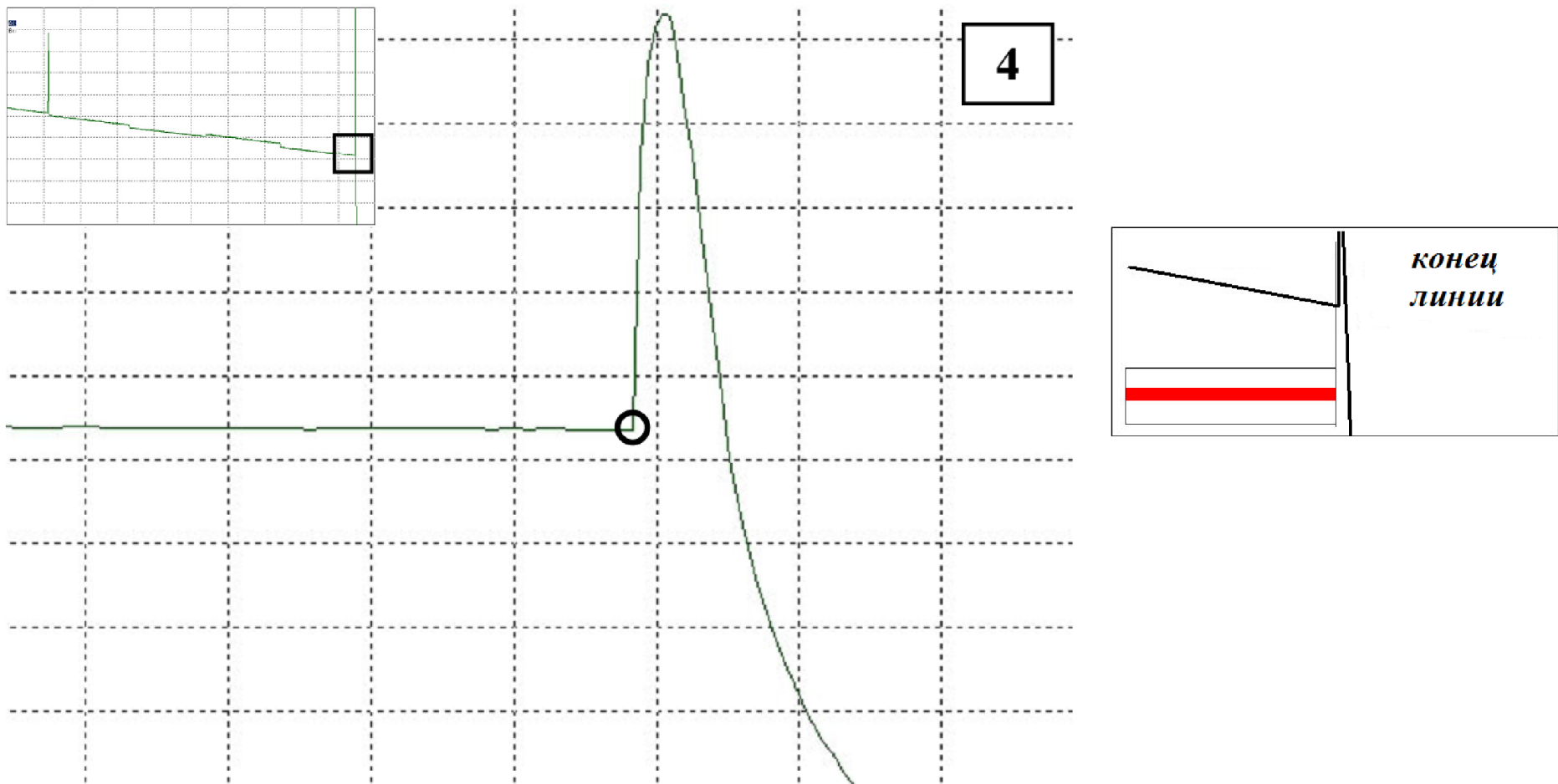


2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: расшифровка отдельных событий

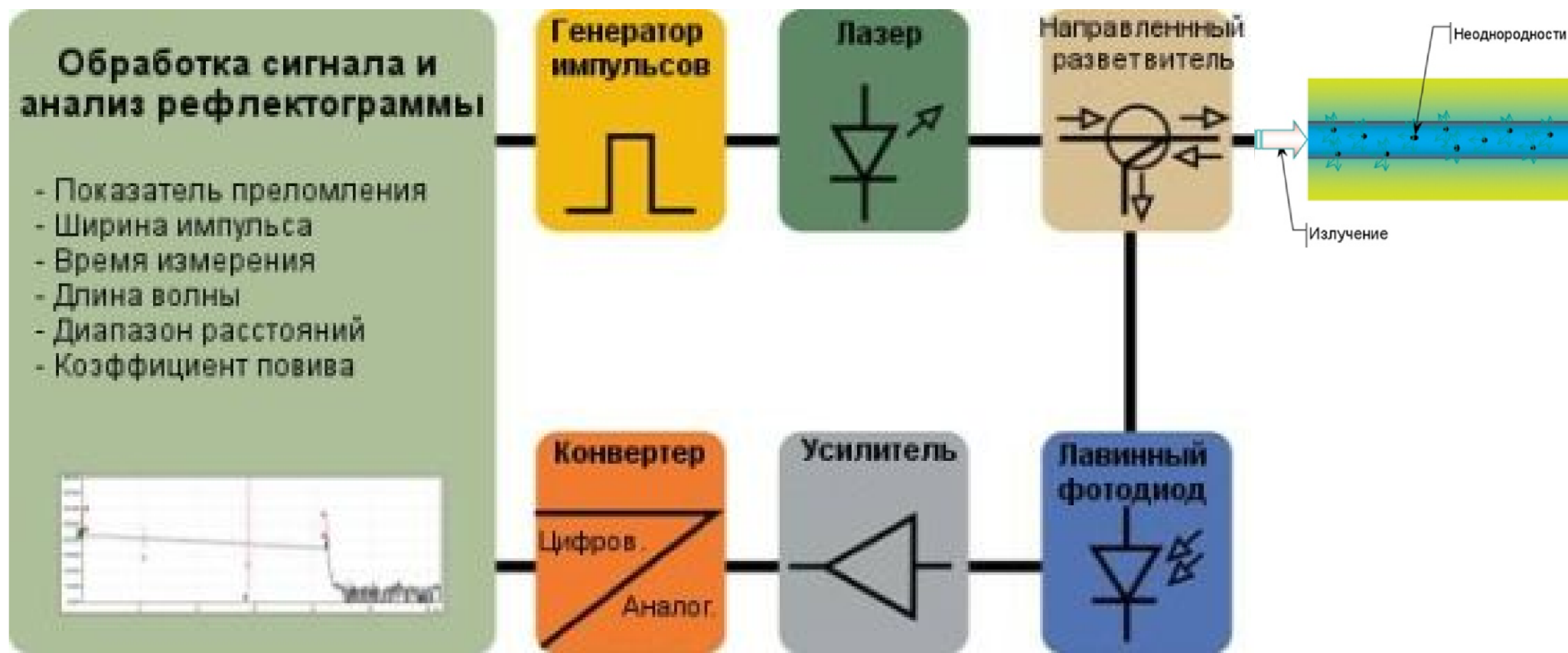
отражающие события:

конец волокна



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: упрощенная схема



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

- Импульсная рефлектометрия: рефлектометр Yokogawa AQ7275



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: рефлектометр Yokogawa AQ7275

Основные характеристики

Тип волокна	SM (ITU-T G.652)
Длина волны	1310 ± 25 нм, 1550 ± 25 нм, 1625 ± 25 нм
Диапазон расстояний	500 м 1 км 2 км 5 км 10 км 20 км 50 км 100 км 200 км 300 км 400 км
Длительность импульса	3 нс 10 нс 20 нс 50 нс 100 нс 200 нс 500 нс 1000 нс 2000 нс 5000 нс 10000 нс 20000 нс
Разрешение выборки	0,05 м 0,1 м 0,2 м 0,5 м 1 м 2 м 4 м 8 м 16 м 32 м
Число точек в выборке	До 50000
Погрешность измерения длины трассы	$2 \times 10^{-5} \times$ (длина трассы) м
Погрешность измерения потерь (нелинейность)	± 0,05 дБ/дБ
Мертвая зона по событию (по отражению)	0.8 м (Длительность импульса 3 нс, уровень обратного отражения 45 дБ)
Тип отображаемых потерь	Односторонние потери Потери на определенный участок измерений
Оптический разъем	FC (встроенный)
Измерение обратных потерь	Измерение обратных потерь, полных обратных потерь на участке кабеля либо по всей длине кабеля.
Мертвая зона по потерям	7 м для 1310 нм 8 м для 1550 нм (Длительность импульса 10нс, уровень обратного отражения -45±0,5 дБ)
Динамический диапазон (С/Ш=1)	40 дБ для 1310 нм, 38 дБ для 1550 нм, 33 дБ для 1625 нм
Количество портов	1
Измерение потерь	Отображение односторонних потерь с шагом 0.001 дБ максимально пятью числами.

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Импульсная рефлектометрия: возможности

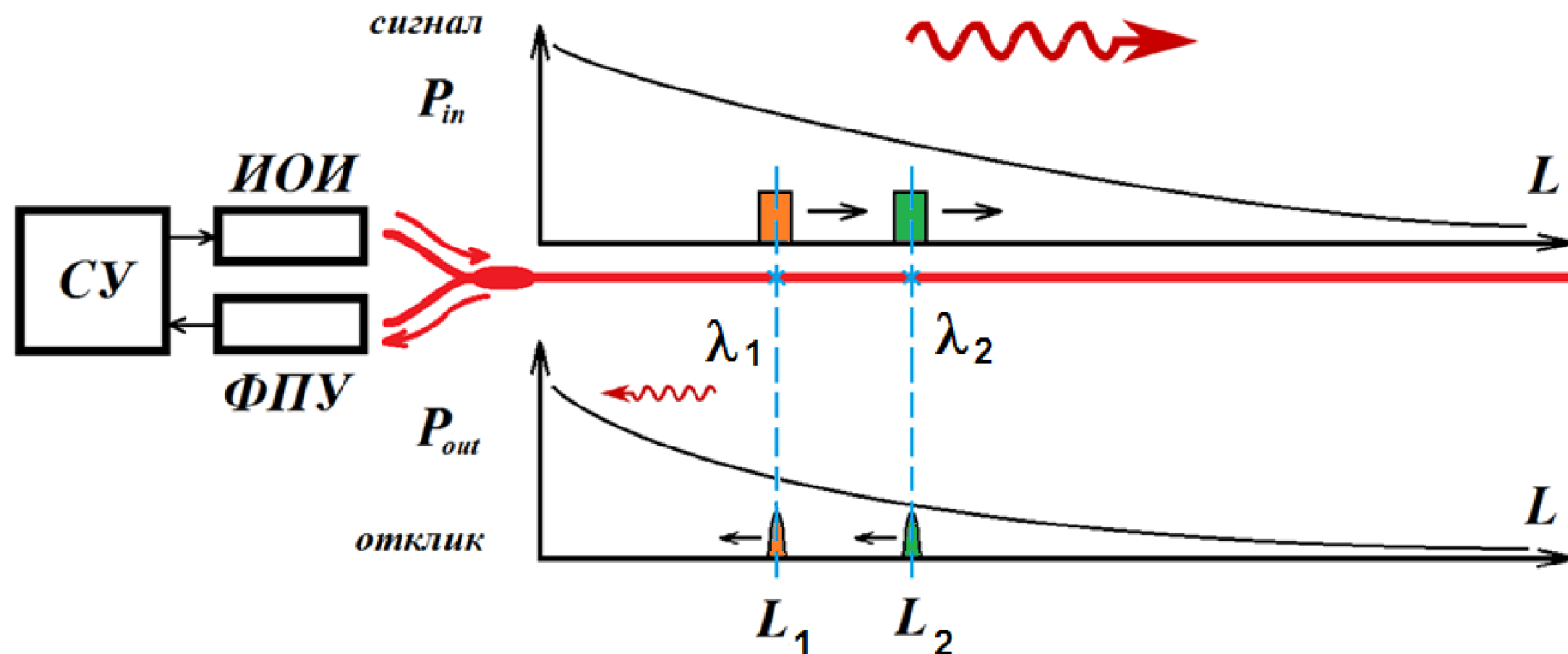
анализ рефлектограммы оптического кабеля позволяет обнаружить и измерить все основные параметры и события в кабеле, в том числе:

- определить длину оптического кабеля (начало и конец линии);
- определить местонахождение и качество сварных соединений (предельно допустимые значения потерь на сварке зависят от типа сети, для городских ВОЛС обычно не более 0,2 dB);
- определить местонахождение и качество оптических коннекторов (предельные значения допустимых величин отражения и потерь зависят от типа сети, типа коннектора и полировки ферулы; обычно отражения не более – 45 dB, потери не более 0,2 dB);
- определить наличие и местоположение трещин, макроизгибов, обрывов;
- измерить потери и отражения на основных событиях;
- измерить суммарные потери на линии

2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Частотная рефлектометрия

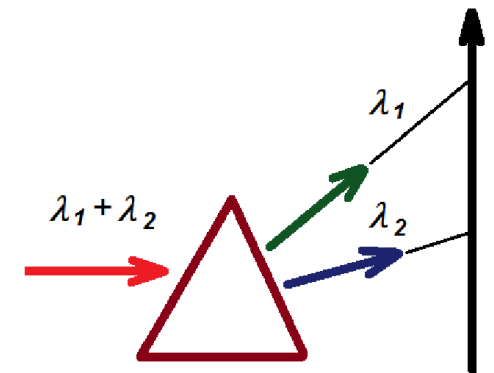
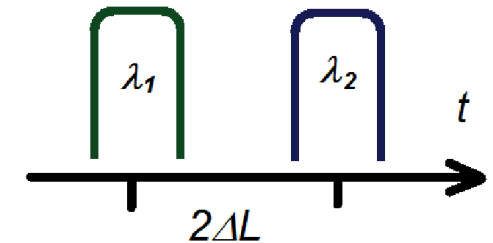
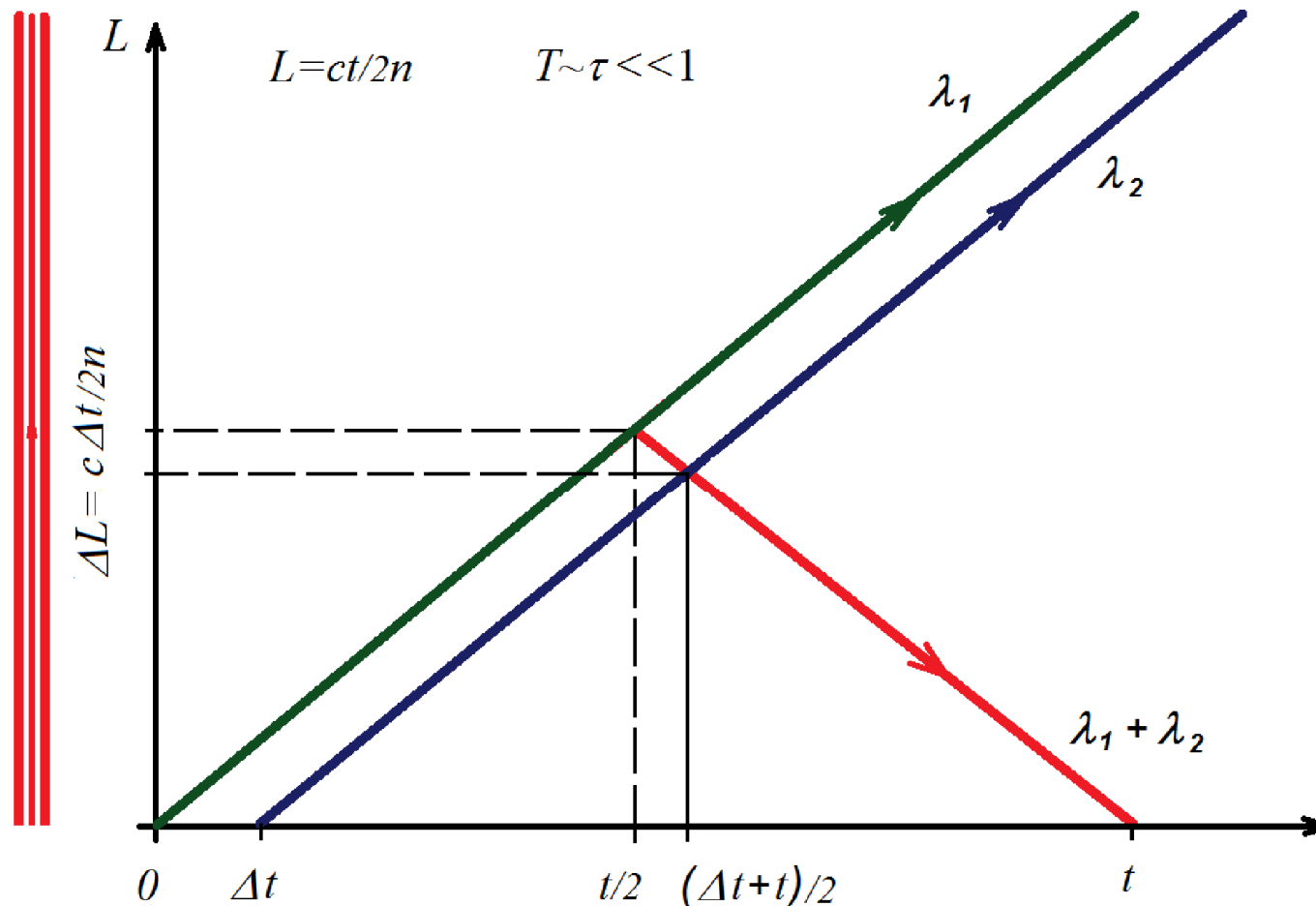
или оптическая рефлектометрия в частотной области (Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR) заключается в зондировании постоянным по мощности оптическим излучением, в котором непрерывно или дискретно изменяется частота (длина волны) зондирующего оптического излучения, что позволяет при регистрации обратного излучения разложить его в спектр и получить пространственное распределение отклика по длине волокна



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Частотная рефлектометрия

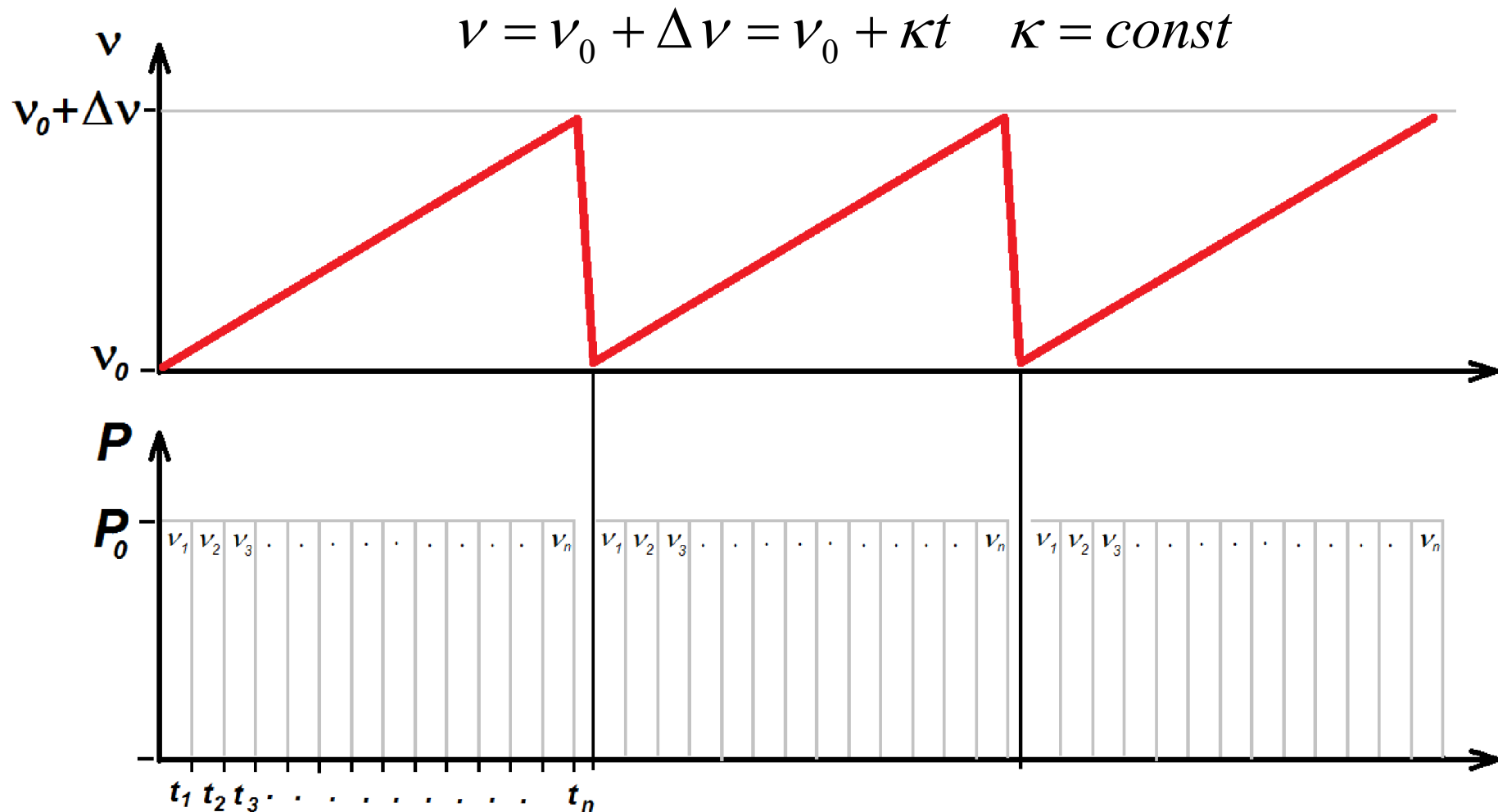
формирование двух частотного отклика от двух (λ_1, λ_2) импульсов одинаковой длительности и мощности задержанных один относительно другого на время Δt



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Частотная рефлектометрия: реализация

частотная модуляция зондирующего сигнала на периоде повторения



2. Характеристика рефлектометрии по способам зондирования

○ Выводы

основное назначение модуляции параметров оптического излучения состоит в локализации отклика среды волокна на оптическое излучение по времени задержки возвращаемого (информационного) сигнала относительно зондирующего сигнала;

используются два метода модуляции

- импульсная модуляция во времени, зондирование одиночными импульсами с разделением отклика от различных участков среды по времени задержки отклика;
- частотная модуляция во времени, зондирование излучением постоянной мощности с изменяемой частотой оптического излучения, в котором разделение отклика от различных участков среды происходит по частоте;

локализация отклика позволяет проводить распределенные измерения по длине волокна с одним входом/выходом

3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ **Понятие**

формирование отклика среды, возвращаемого обратно, несет информацию о состоянии волокна в месте формирования;

основные физические процессы формирования отклика связаны с явлениями

— рассеяния (упругим и неупругим), главным образом с рэлеевским рассеянием;

— френелевского отражения;

при этом в качестве источника информации используется величина амплитудного отклика (непрерывная, импульсная, частотная рефлектометрия);

но формируемый отклик когерентен и поляризован, хотя бы частично, что также несет информацию о состоянии среды – возможности для анализа фазовых и поляризационных модуляций используется при использовании, соответственно, фазовой и поляризационной рефлектометрии

3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ **Спектральная рефлектометрия**

основана на нелинейном отклике зондируемой среды, которое проявляется в изменение спектра возвращаемого излучения и связанное с нелинейно-оптическими эффектами, такими как

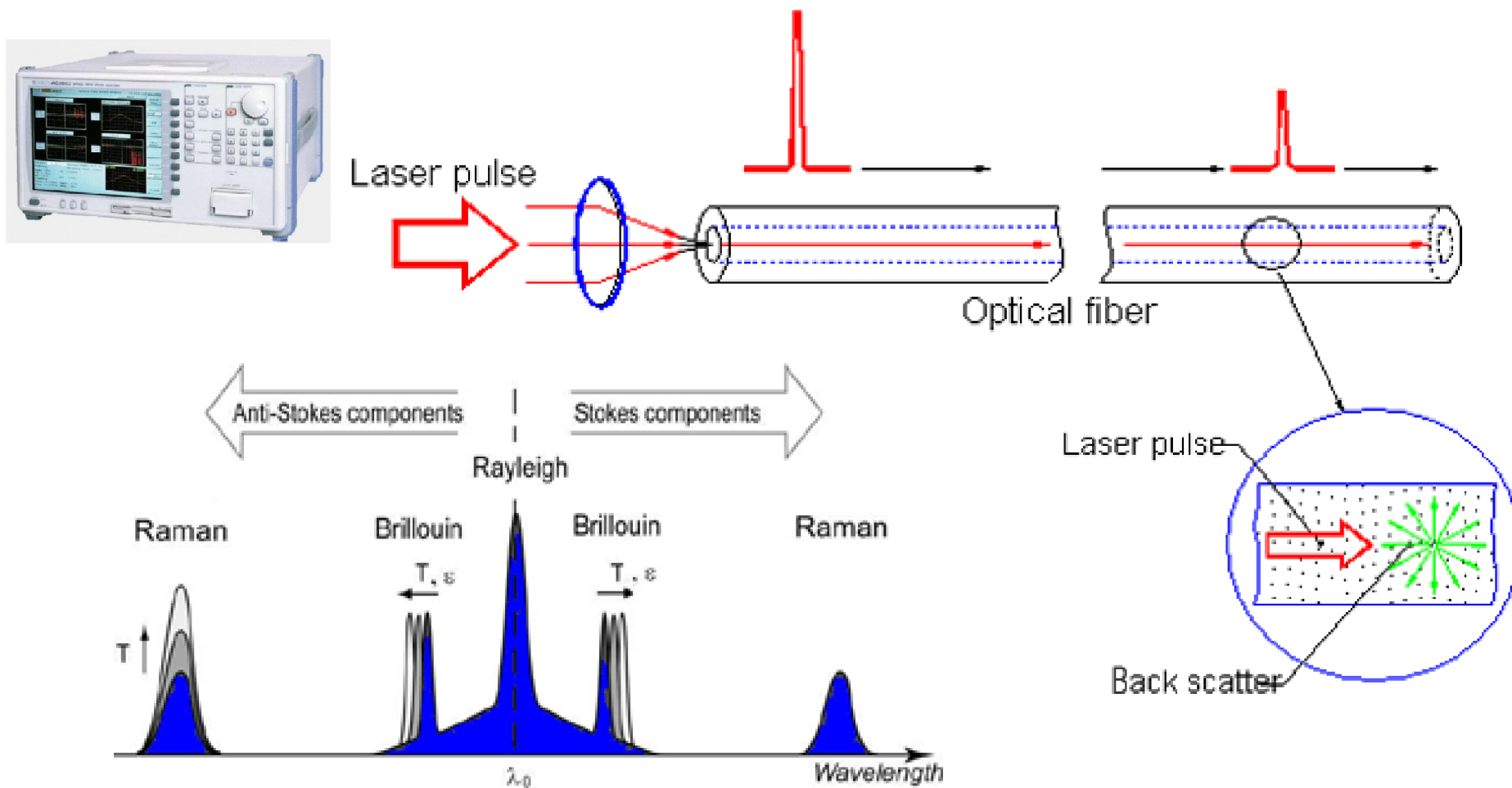
- неупругое рассеяние – рамановское и бриллюэновское;
- люминесценция - фотолюминесценция;
- генерация гармоник – вторая, третья и т.д.;
- и др.



3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ **Спектральная рефлектометрия**

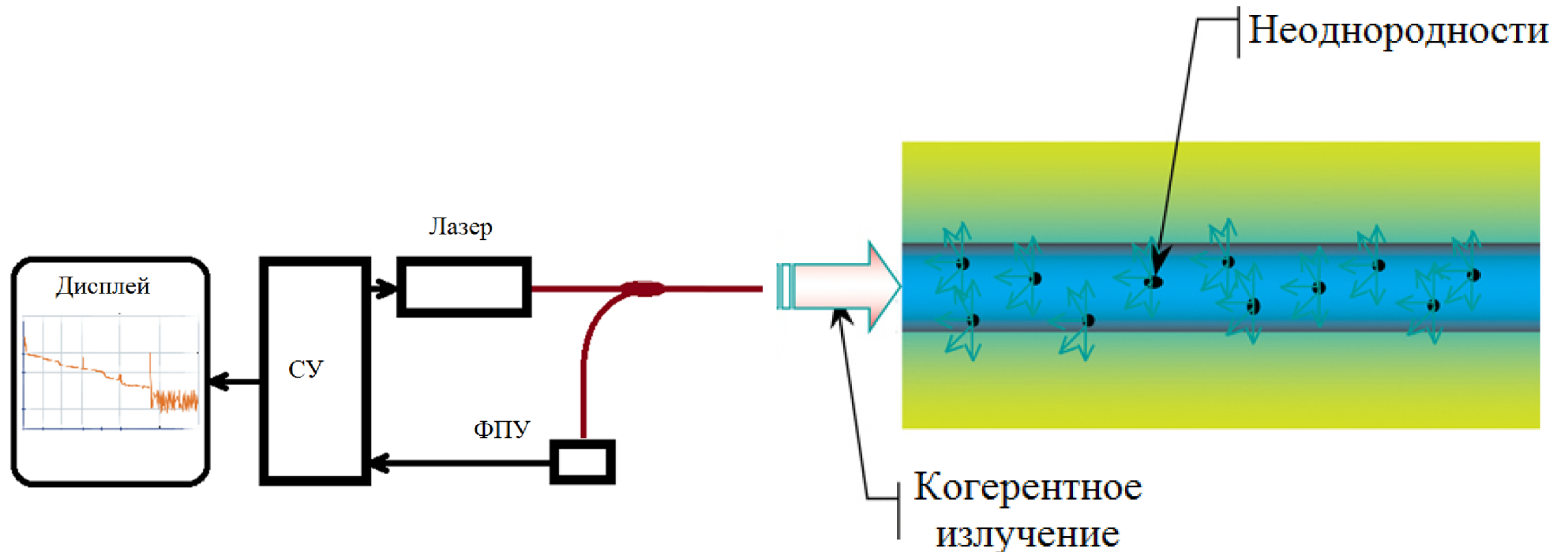
бриллюэновская рефлектометрия (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, B-OTDR)



3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ Фазовая рефлектометрия

основана на регистрации фазовых изменений возвращаемого оптического излучения в зондируемой среде, регистрация которых производится по одной из интерференционных схем

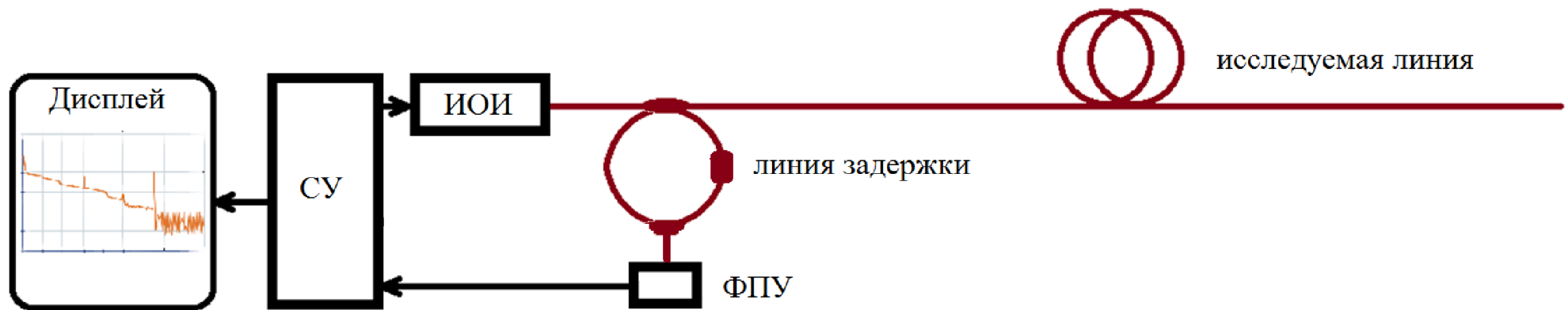


обратно рассеянное на неоднородностях когерентное оптическое излучение является частично когерентным, что позволяет реализовать интерференционные схемы измерения разности фаз

3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ Фазовая рефлектометрия

— когерентная рефлектометрия (Coherent Optical Time Domain Reflectometer, CO-OTDR) по схеме оптического гетеродинирования



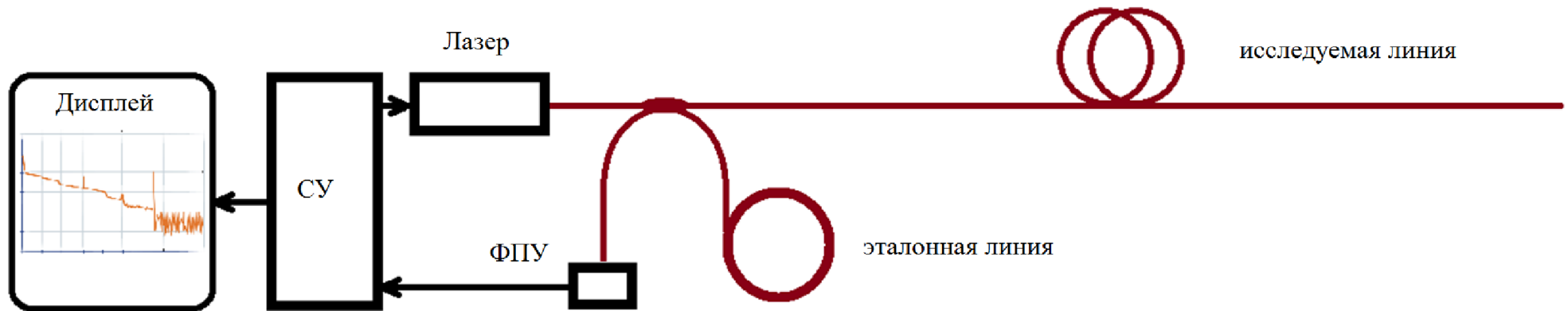
гетеродинирование

преобразование несущей частоты сигнала с использованием гетеродина; гетеродинирование света, нелинейное преобразование оптического излучения с использованием опорного оптического излучения в электрический сигнал, несущий информацию о параметрах преобразуемого излучения.

3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ Фазовая рефлектометрия

— интерферометрия обратного рассеяния (backscattering interferometry – BSI) оптических волокон



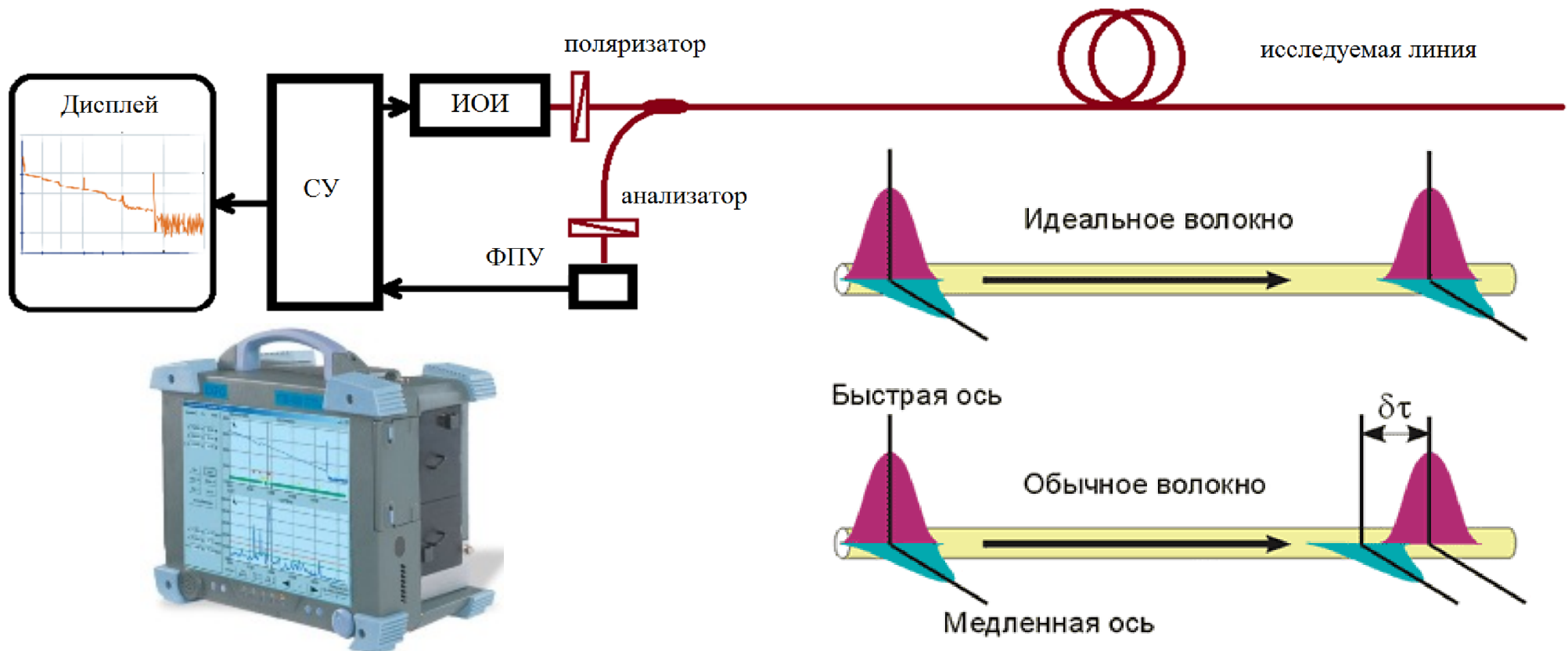
регистрация когерентного обратнорассеянного излучения по схеме Майкельсона, в котором отклик исследуемой линии (исследуемое плечо интерферометра) интерферирует с откликом полученным из эталонной линии (тестовое плечо интерферометра) при импульсном зондирующем излучении

3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ Поляризационная рефлектометрия

основана на регистрации поляризационных изменений возвращаемого оптического излучения в зондируемой среде;

— поляризационная рефлектометрия (Polarization Optical Time Domain Reflectometer, P-OTDR) обратнорассеянного излучения



3. Характеристика рефлектометрии по отклику среды

○ Выводы

зондирование оптической сети импульсами с различными параметрами (амплитудой, длиной волны, когерентностью, поляризацией) и последующий анализ обратно возвращаемого сигнала позволяет повысить информативность отклика среды волокна:

амплитудные изменения – о потерях в волокне, механических воздействиях;

спектральные изменения – о нелинейностях среды волокна;

когерентное излучения – согласовать отклик, повысить чувствительность;

поляризационные изменения – о структурных неоднородностях в волокне;

одновременное использование контроля отклика по нескольким параметрам позволяет провести мультиплексирование измерений

4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации

○ **Понятие**

характеристики рефлектометрических методов исследования возможно улучшить путем усложнения методов регистрации оптического излучения

сравнением параметров зондирующего импульса и отклика – они должны быть связаны между собой (корреляционный метод);

переходом на вероятностные методы обработки сигналов при слабых величинах возвращаемого сигнала, т.е. при больших зондируемых дистанциях (метод счета фотонов);

другое

4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации

○ Корреляционная рефлектометрия

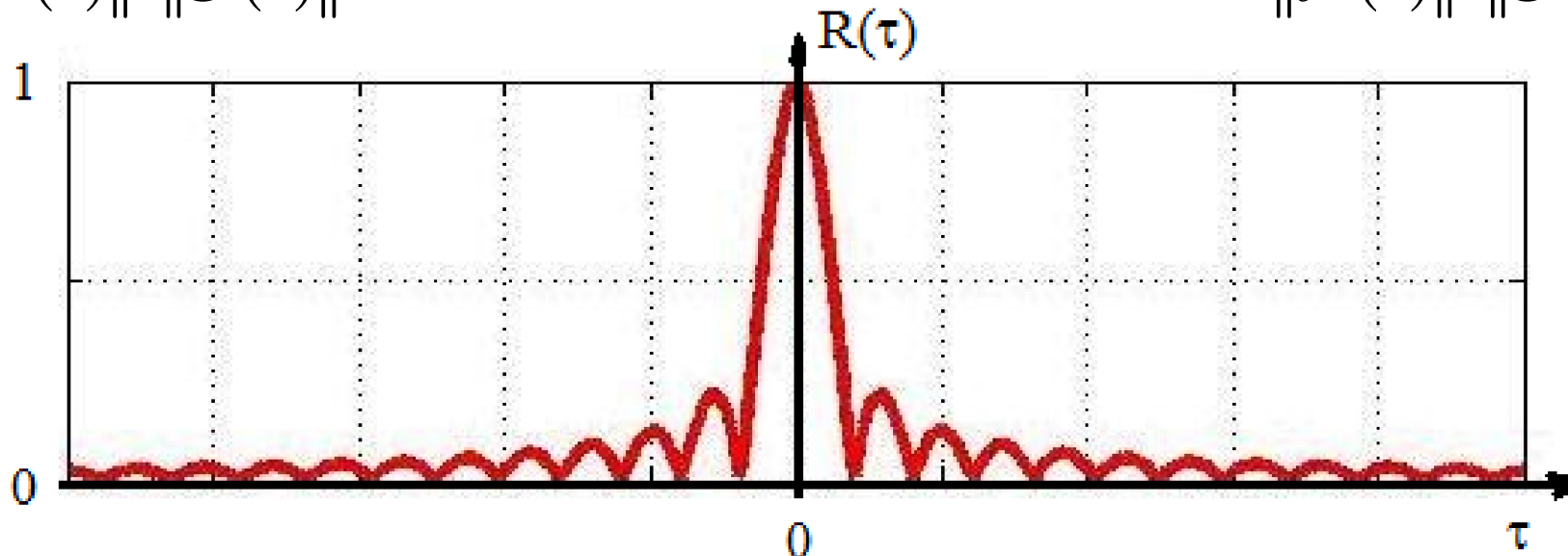
корреляционная (Correlation OTDR, COR-OTDR) и слабо корреляционная (Low Correlation OTDR, LC-OTDR) рефлектометрия использует корреляционную связь между зондирующим $f(t)$ сигналом и возвращаемым $g(t+\tau)$ сигналом

коэффициент корреляции

функция корреляции

$$r = \frac{\langle f(t), g(t) \rangle}{\|f(t)\| \cdot \|g(t)\|} = \max_{\tau=0} R(\tau)$$

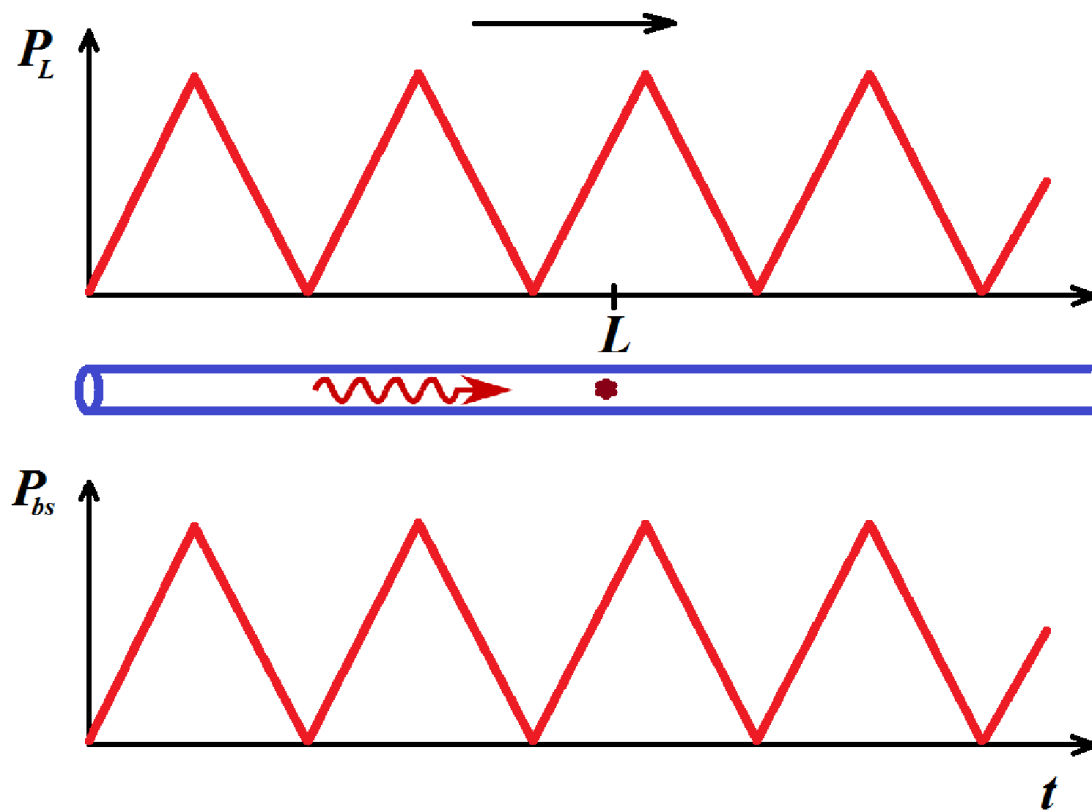
$$R(\tau) = \frac{\langle f(t), g(t+\tau) \rangle}{\|f(t)\| \cdot \|g(t)\|}$$



4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации

○ Корреляционная рефлектометрия

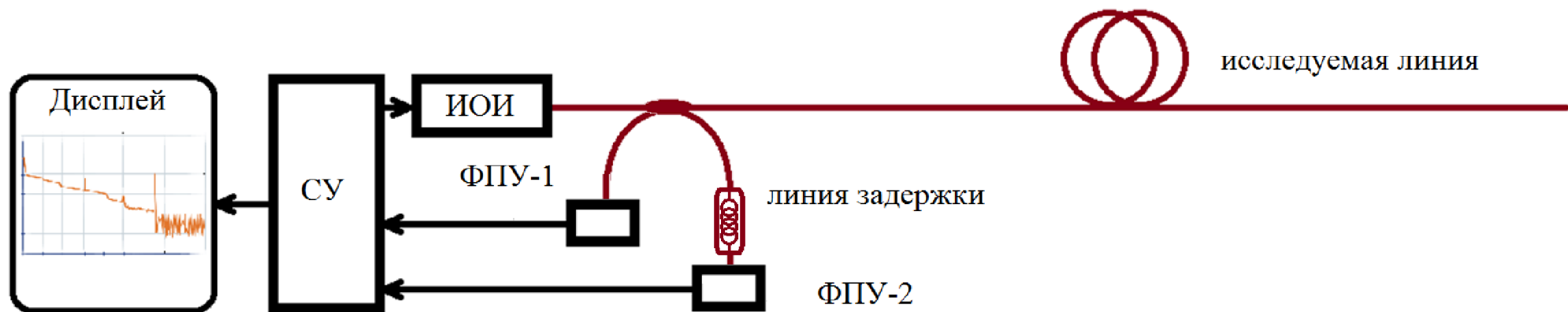
корреляционная связь между зондирующим $f(t)$ сигналом и возвращаемым $g(t+\tau)$ сигналом



4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации

○ Корреляционная рефлектометрия

— оптическая схема



для зондирования используется случайная функциональная зависимость параметра источника оптического излучений от времени, например, по амплитуде (случайная последовательность импульсов);

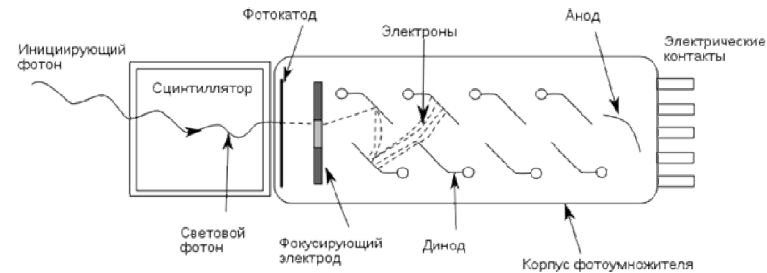
регистрируются параметры зондирующее (ФПУ-2) и возвращаемого (ФПУ-1) излучений;

вычисляется корреляционная функция;

4. Характеристика рефлектометрии по методам регистрации

○ Рефлектометрия режима счета фотонов

(Photon Counting OTDR, PC-OTDR) оптический рефлектометр с фотоприемником работающем в режиме счета фотонов использует импульсы малой мощности или ослабленный отклик среды в различных оптических схемах;



использование режима счета фотонов может повысить точность измерений или повысить предельные расстояния для проведения измерений;

режимом счета фотонов называется детектирование слабых оптических сигналов, при котором регистрируются отдельные фотоны за фиксированное время, а не мощность сигнала; метод отличается высокой чувствительностью, возможностью проведения квантово-статистических измерений характеристик материала;

5. Системы мониторинга оптических сетей

○ Понятие

система дистанционного тестирования волокон предназначена для организации непрерывного мониторинга состояния оптического волокна и позволяет оперативно выявлять возникающие неисправности, такие как обрыв кабеля, недопустимое увеличение потерь, а также отслеживать слабые изменения сигнала в волокне, что позволяет своевременно проводить профилактические работы.

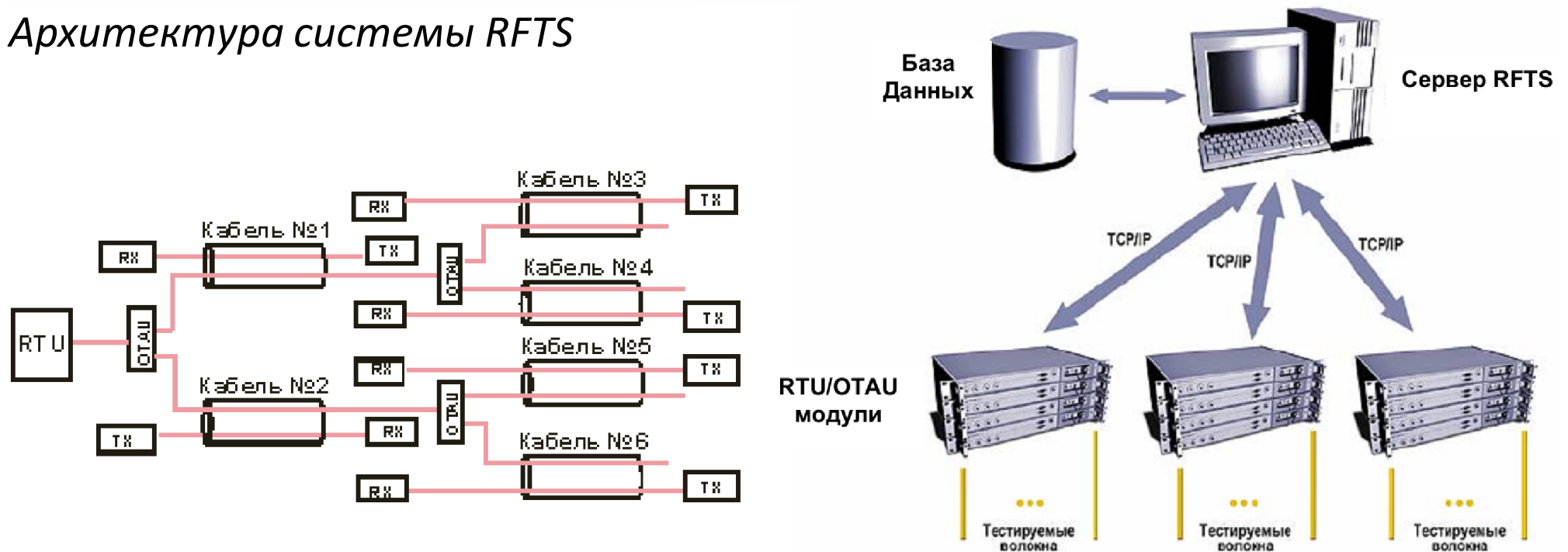
Система может обнаруживать попытки несанкционированного подключения к оптическому волокну с одновременной локализацией точки подключения, подачей сигнала тревоги и, при необходимости, оперативным отключением волокна.



5. Системы мониторинга оптических сетей

○ Система удаленного контроля волокон (Remote Fiber Test System, RTFS)

Архитектура системы RFTS



состоит из блоков дистанционного тестирования (**Remote Test Unit** , **RTU**), дистанционно управляемых оптических коммутаторов (**Optical Test Access Unit**, **ОТАУ**) и сервера управления системой.

RTU предназначены для удаленного тестирования оптических волокон рефлектометрическим методом и передачи полученной информации на сервер, где осуществляется управление системой и накапливаются данные о состоянии всех контролируемых оптических волокон,

ОТАУ предназначены для тестирования различных ветвей сети и позволяют минимизировать количество **RTU** использующихся в системе, снижая таким образом стоимость решения, сервер осуществляет общее управление системой.

5. Системы мониторинга оптических сетей

○ Система удаленного контроля волокон (Remote Fiber Test System, RTFS)

Принципы работы RFTS – оптический рефлектометр непрерывно снимает данные по затуханию в волокне и сравнивает их с эталонной рефлектограммой, и при обнаружении отклонений превышающих заданные пороговые значения, генерирует сигнал тревоги; система позволяет выявить сам факт появления аномалии в волокне и определить ее расположение на местности, это дает возможность оперативно реагировать на возникающие проблемы; порядок, интервалы опроса и допустимые отклонения от эталонной рефлектограммы задаются в центральном офисе.

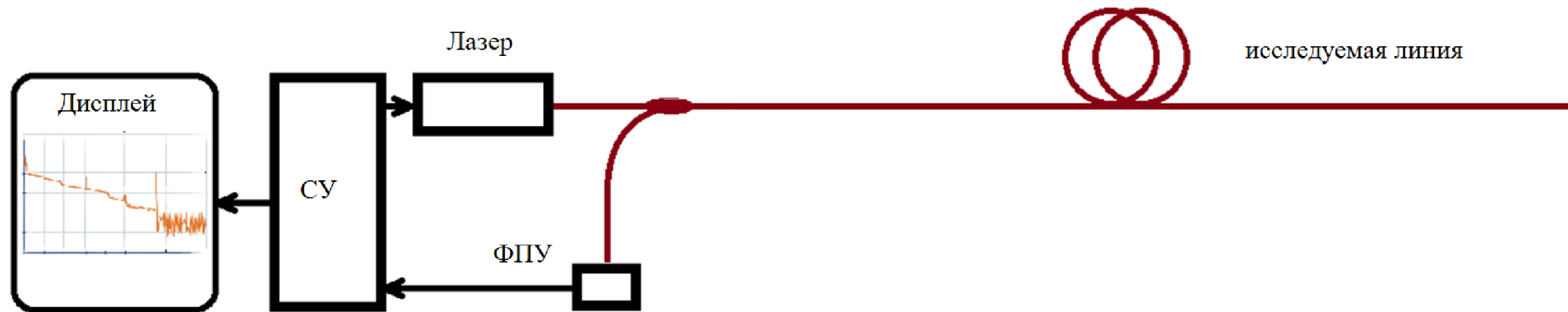
Возможности RFTS

- непрерывный контроль ВОСП;
- сокращение времени поиска и устранения аварий;
- своевременный профилактический ремонт;
- меньший обслуживающий персонал;
- анализ состояния и динамики развития системы;
- обнаружение несанкционированного доступа;

6. Оптическая рефлектометрия в измерительных системах

○ Понятие

рефлектометрическая схема измерений наиболее востребована в волоконно-оптических измерительных системах, так как позволяет



- локализовать измеряемый параметр;
- проводить распределенные измерения;
- осуществить мультиплексирование измерений;
- повысить чувствительность измерений;

Темы для обсуждения по лекциям 9-10

«Рефлектометрия оптических волокон»

Принципы оптической рефлектометрии и её возможности.

Характеристика рефлектометрии по способам зондирования.

Характеристика рефлектометрии по физическим принципам отклика на зондирование.

Характеристика рефлектометрии по методам регистрации.

Системы мониторинга оптических сетей методами рефлектометрии.

Оптическая рефлектометрия в измерительных системах.