

## **Введение**

В настоящее время волоконно-оптические системы связи и передачи информации бурно развиваются во многих странах мира. Процесс развития и совершенствования ВОЛС связан с созданием глобальных магистральных линий связи различного назначения. Эти линии связи уже не имеют конкурентов по скорости передачи, высокой надежности и помехоустойчивости. Работа ВОЛС обеспечивается на основе массово применяющихся волоконно-оптических кабелей различного назначения, контроль светопропускания которых является насущной и крайне актуальной задачей.

В процессе эксплуатации ВОЛС возникают эффекты постепенного возрастания потерь в ВОК, а также внезапные нарушения его светопроводности. В этих случаях необходимо определить в короткие сроки координаты мест повреждения ВОК и проводить необходимые ремонтные работы.

При анализе функционирования ВОК используются частотный и импульсный методы рефлектометрии.

В данной статье рассматриваются достоинства и недостатки этих методов, и впервые описывается предложенный нами метод рефлектометрии следующего поколения - частотно-импульсный. Этот метод контроля потерь ВОК сочетает в себе достоинства методов частотной и импульсной рефлектометрии, но превосходит их по чувствительности, необходимой для измерения малых потерь и точного расстояния до места внезапного разрушения ВОК. Он также позволяет получать данные о локальных натяжениях ОВ.

Метод не предъявляет высоких требований к мощности излучения, вводимого в ОВ, что позволяет использовать его в системах непрерывного мониторинга состояния ВОК.

### **Метод импульсной рефлектометрии**

Наиболее развитым методом импульсной рефлектометрии [1] является метод OTDR (Optical time-domain reflectometer). В настоящее время серийно выпускается большая номенклатура OTDR рефлектометров.

Современные оптические рефлектометры имеют динамический диапазон измерения до 46дБ и разрешение до 0,001 дБ [2]. В состав рефлектометров, кроме источника мощного зондирующего сигнала малой длительности, фотоприемника и разветвителя входит блок обработки, обеспечивающий широкие функциональные возможности приборов (получение, обработку, запись, хранение и анализ рефлектограмм). Структурная схема импульсного рефлектометра представлена на рис. 1.

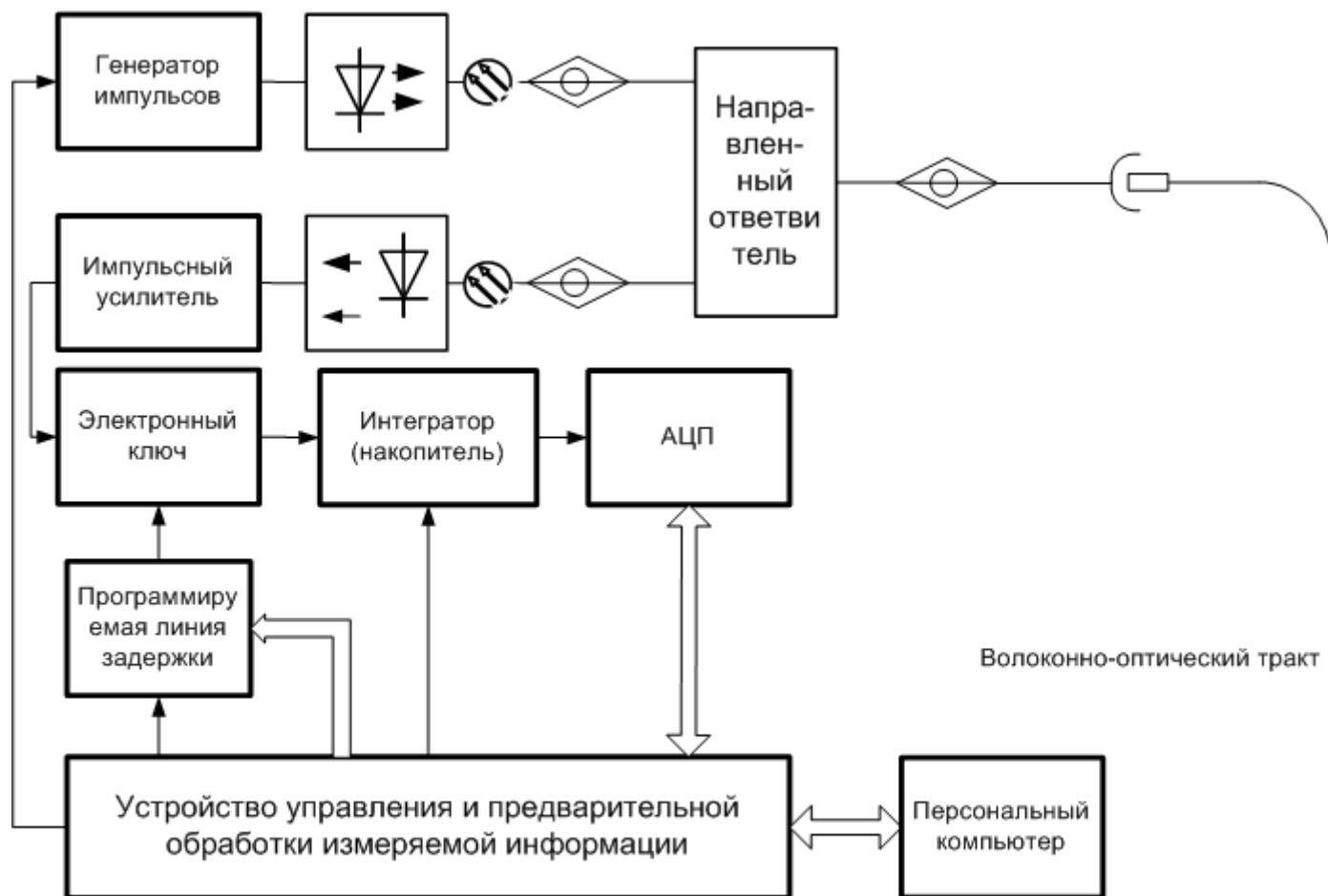


Рис. 1

Основными недостатками метода OTDR являются:

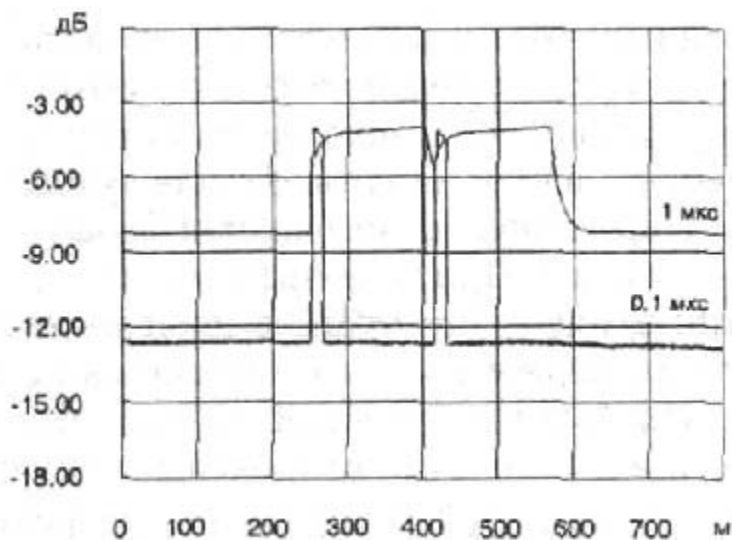
- при высоком разрешении по длине волоконно-оптического тракта (что имеет важное значение для обнаружения локальных неоднородностей ВОК или при фиксации мест несанкционированного съема информации), значительно уменьшается динамический диапазон и контролируемый участок ВОК. Например, в рефлектометре HP8147 для разрешения  $x = 1$  м динамический диапазон снижается до 9 дБ с 28 дБ при максимальной длине ВОК - 1000 м.
- мощные зондирующие импульсы затрудняют проведение контроля ВОК во время передачи информации, что ограничивает возможности рефлектометра, а также усложняет и удорожает систему диагностики. Источники излучения имеют ресурс, недостаточный для длительного непрерывного контроля ВОЛС;
- специализированные источники зондирующего оптического излучения, а также широкополосная и быстродействующая аппаратура приемного блока рефлектометра значительно удорожает устройство в целом.

Проведем оценку соотношения динамического диапазона и разрешающей способности метода OTDR.

Значительным ограничением для любого стандартного прибора реализующего метод OTDR является компромисс между динамическим диапазоном и разрешающей способностью. Принимаемый сигнал  $s(t)$  может быть представлен в виде свертки зондирующего импульса  $p(t)$ , ответного импульса обратного рассеяния волокна  $f(t)$  и отклика приемника  $r(t)$  [3]

$$s(t) = p(t) \otimes f(t) \otimes r(t)$$

Поэтому достигаемая разрешающая способность ограничена откликом приемника и геометрической шириной зондирующего сигнала. Для обеспечения высокой разрешающей способности на большом расстоянии длительность зондирующего импульса должна быть как можно меньше, а диапазон рабочих частот приемника - как можно шире. Что ведет к уменьшению отношения сигнал/шум. В то же время, увеличение принимаемого сигнала за счет использования более продолжительных зондирующих импульсов и приемников с низким уровнем шума приведет к повышению чувствительности при соответствующем снижении разрешающей способности OTDR. На рис.2 иллюстрируется влияние пространственной ширины импульса и чувствительности приемника на разрешающую способность рефлектометра. Показаны два отраженных импульса, расположенных на расстоянии 100 м друг от друга. Их длительности 1 мкс и 100 нс. Хотя верхняя рефлектограмма показывает более равномерное обратное рассеяние, чем нижняя, недостаток пространственной разрешающей способности очевиден.



Повышение выходной мощности лазера увеличивает уровень сигнала обратного рассеяния при заданной длительности импульса. К сожалению, использование сверхмощных источников в рефлектометрах ограничивается их низкой надежностью и высокой стоимостью, а также требованием обеспечения безопасности персонала при работе с ними. Кроме этого, при распространении мощного излучения в ВОК, возникают нежелательные нелинейные эффекты - Рамановское рассеяние и рассеяние Манделштама. Технология широкополосной связи с соответствующей обработкой сигналов, например, нахождение их корреляционных функций, преодолевает это ограничение и обеспечивает возможность улучшения отношения сигнал/шум без оказания какого-либо отрицательного влияния на разрешающую способность системы. Эти приемы широко используются в радиолокационных и других системах, которые имеют ограничения по пиковой мощности. В OTDR, однако, корреляционный принцип является не слишком эффективным в основном из-за того, что даже небольшие нелинейности в аналоговых технических средствах приводят к появлению ложных сигналов, ведущих к неправильной интерпретации результатов.

#### **Литература:**

1. Метод и устройство для оптической рефлектометрии волокон во временной области. GB пат. 2167261A от 16.11.84 г., G 01 S 17/10, G 02 B 6/00.
2. Свинцов А.Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС - М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
3. Иванов А.В. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. - М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.

## **Метод частотной рефлектометрии**

Метод частотной рефлектометрии [1, 2], OFDR (Optical frequency domain reflectometr), также называется методом частотно-модулированного зондирования (ЧМЗ). В этом случае в ОВ вводится не импульсное оптическое излучение, а непрерывный сигнал, частота которого промодулирована сигналом, изменяемым по заданному закону (см. рис. 1).

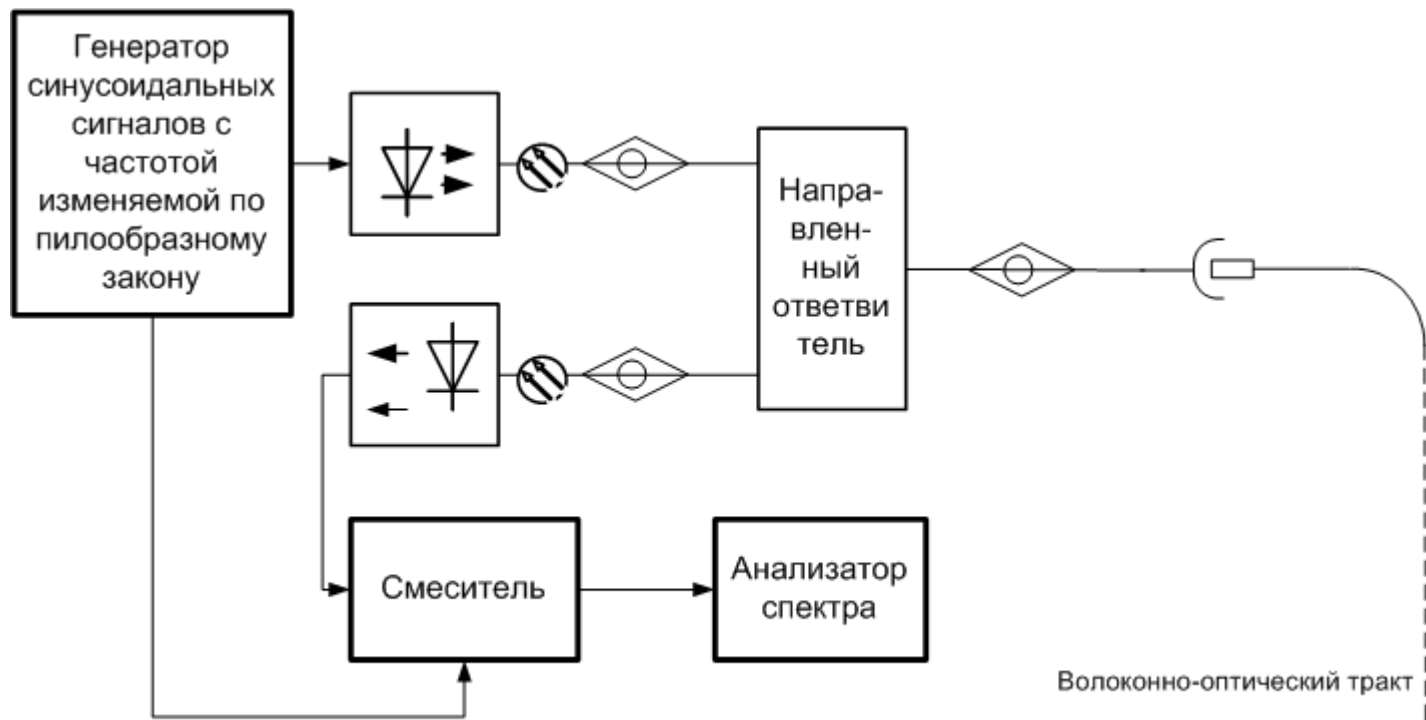


Рис. 1

Отраженный в ОВ задержанный сигнал возвращается и смешивается с зондирующим незадержанным (опорным) сигналом. В результате формируется сигнал биений, частотный спектр которого и описывает эволюцию зондирующего сигнала вдоль волоконного тракта.

Как правило, в методе ЧМЗ используется линейная модуляция частоты сигнала. При этом частота сигнала биений  $F$  связана с задержкой прохождения зондирующего сигнала до участка ОВ с координатой  $x$  следующим образом:

$$F = \gamma \tau = (2\omega F_m)(2nx / c)$$

где

$\omega$  - девиация частоты зондирующего сигнала,

$F_m$  - частота повторения функции модуляции зондирующего сигнала,

$\gamma = 2\omega F_m$  - скорость перестройки частоты зондирующего сигнала,

$n$  - показатель преломления сердцевины оптического волокна,

$c$  - скорость света в вакууме.

Таким образом, из спектра сигнала  $P(f)$  распределение по координате  $x$  восстанавливается по формуле:

$$x = (c / 4n\omega)(F / F_m)$$

Проведем анализ разрешения и динамического диапазона такого ЧМЗ - рефлектометра.

В методе ЧМЗ, в отличие от импульсной рефлектометрии, разрешение определяется не длительностью зондирующего импульса, а величиной девиации частоты:

$$\Delta x = (c / 4n\omega)(\Delta F / F_m)$$

где

$\Delta F$  - точность измерения спектра сигнала биений.

Из-за особенностей сигнала биений  $\Delta F \geq F_m$

$$\Delta x \geq (c / 4n\omega) = 50 / \omega$$

В табл. 1 представлена экспериментальная [3] зависимость разрешающей способности от величины девиации частоты зондирующего сигнала.

Таблица 1

$\omega$	1 МГц	10 МГц	100 МГц	1 ГГц	10 ГГц	100 ГГц
$\Delta x$	50 м	5 м	0,5 м	5 см	5 мм	0,5 мм

В отличие от импульсной рефлектометрии в методе ЧМЗ для улучшения разрешения необходимо не расширять полосу пропускания блока обработки, а снижать ее. Чем уже ширина полосы пропускания фильтра в блоке спектральной обработки, тем лучше спектральное разрешение сигнала биений и соответственно лучше пространственное разрешение. Это принципиальное отличие в основном является преимуществом метода ЧМЗ. Для разрешения порядка одного метра в импульсном рефлектометре необходимо

обеспечивать полосу пропускания блока обработки порядка  $Df=100$  МГц, в ЧМЗ приемнике можно использовать блок обработки с полосой  $DF = 0,01$  Гц. При равенстве спектральной плотности шума ФПУ в обоих случаях выигрыш в шумах приемного блока ЧМЗ аппаратуры можно оценить как

$$\left( \frac{\Delta f}{\Delta F} \right)^{\frac{1}{2}} = 10^5$$

В работе [3] было показано, что шумы фотоприемника могут достигать минус 153 дБм, при этом динамический диапазон рефлектометра не будет превышать 30 дБ.

В табл. 2 приводится сравнение оценок динамических диапазонов для методов OTDR D(T) и ЧМЗ D(F) для разных разрешений  $Dx$ .

Таблица 2.

$Dx$	1 м	10 м	100 м	1 км	2 км
D(T)	17,5 дБ	25 дБ	32,5 дБ	40 дБ	42 дБ
D(F)	31 дБ	36 дБ	41 дБ	46 дБ	47,5 дБ

Из данных табл.2. следует, что ЧМЗ рефлектометры наиболее эффективно работают при требованиях на высокое пространственное разрешение. К преимуществам также можно отнести более простое и эффективное решение приемной части прибора, в частности аналого-цифрового преобразователя - АЦП. Так как сигнал биений располагается в диапазоне звуковых частот (десятки кГц), то можно использовать более точные и одновременно существенно более дешевые АЦП. Проблемы частотных рефлектометров связаны со спектральным анализом сигнала биений (в особенности для релейского отражения), с обеспечением необходимой длины когерентности зондирующего сигнала и заданных режимов модуляции зондирующего сигнала.

### Литература:

1. Koichi IYAMA, Takahiro Maeda, Saburo Takamiya. Phase-Decorrelated FMCW Reflectometry for Long Optical Characterization by Using a Laser Diode with Modulated External - Cavity. - IEICE TRANS. ELECTRON., vol. E83-C, NO 3, March 2000, p. 428-434.
2. Яковлев М.Я., Цуканов В.Н., Устинов Ю.А. Устройство для измерения характеристик оптических волокон. Авторское свидетельство № 904435 от 08.10.1981 г.
3. Свинцов А.Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС - М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.



## Частотно - импульсный метод рефлектометрии

Суть этого метода поясняется рис. 1. Источник оптического излучения (полупроводниковый лазер) управляется формирователем режима работы (ФРР), работающим либо в импульсном, либо в непрерывном режимах. Через резистор (R) на лазерный диод подается небольшое смещение по току от генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН), в результате чего изменяется длина волны источника излучения (см. рис. 2.)

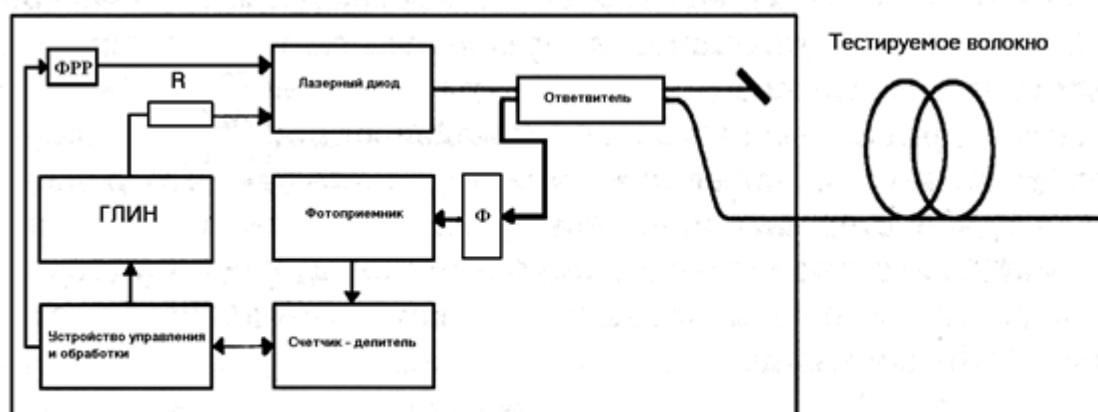


Рис. 1

Если на выходе ответвителя перед фотоприемником, установить узкополосный фильтр оптического излучения (Ф) с полосой  $\Delta\lambda$ , то фотоприемник зарегистрирует сигналы отраженные от локальных неоднородностей линии связи, в виде импульсов.

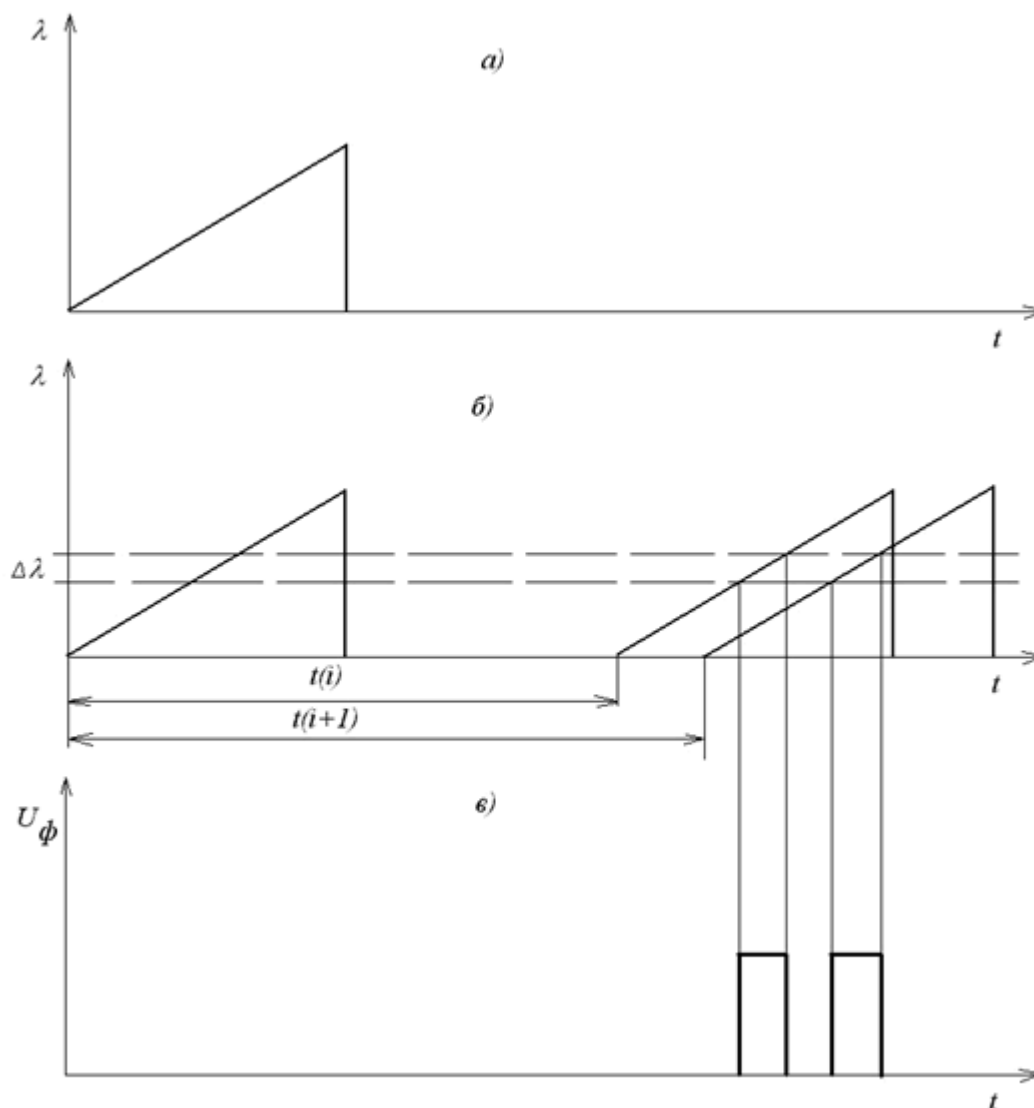


Рис. 2

На эюре а) рис.5. представлен тест - сигнал. Длина волны тест - сигнала изменяется при изменении тока смещения от генератора линейно-изменяющегося напряжения. На эюре б) Рис.5 показан сигнал, отразившийся от  $i$ -ой неоднородности ОВ, и направленный на оптический вход фотоприемного устройства через узкополосный оптический фильтр с полосой пропускания  $\Delta\lambda$ . На эюре в) рис.5 иллюстрируется сигнал, регистрируемый фотоприемником. Длительность сигнала, а следовательно разрешающая способность измерений, зависят от скорости изменения тока смещения и полосы пропускания оптического фильтра.

ЧИР работает в автоколебательном режиме. При этом частота работы автогенератора определяется расстоянием до места расположения одной из неоднородностей волоконно-оптического тракта. Выбор измеряемой неоднородности осуществляется при помощи устройства управления и обработки и счетчика - делителя, выделяющего сигнал от выбранной неоднородности.

Произведем оценку параметров устройства.

Период автоколебательного процесса при обработке каждой неоднородности состоит из двух составляющих:

$$T = t_y + 2t$$

где  $t_y$  - задержка оптического сигнала в узлах устройства;  $t$  - задержка оптического сигнала в измеряемом волоконно-оптическом тракте.

Известно, что задержка оптического сигнала в волокне определяет его длину по формуле:

$$L = \frac{ct}{n_c} = \frac{c(T - t_y)}{2n_c}$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;  $n_c$  - показатель преломления сердцевины волокна.

Таким образом, по периоду следования импульсов можно рассчитать расстояние до места неоднородности. Что осуществляется устройством управления и обработки отраженного сигнала.

Повысить точность измерения расстояния от начала волокна до места расположения неоднородности можно путем накопления и усреднения отраженных сигналов. Можно показать, что при времени усреднения 30 с разрешающая способность в предложенном методе при длине оптического волокна 2000 м составит - 3,14 см.

Погрешность же измерений будет определяться стабильностью кварцевых тактовых генераторов и стабильностью задержек сигналов в узлах рефлектометра. Задавая стабильностью кварцевых тактовых генераторов  $d = 10^{-8}$  и нестабильностью задержки в микросхемах равной 0,2 нс погрешность измерения времени задержки составит 0,2 нс, что соответствует длине оптического волокна 40 см.

### Выводы

1. Предложен новый метод частотно-импульсной рефлектометрии в котором разрешающая способность не зависит от длительности зондирующего сигнала. Поэтому длительность этого сигнала составляет десятки наносекунд, что на порядок выше чем у OTDR. Кроме того показано, что динамический диапазон измерений и отношение сигнал/шум в методе ЧИР тоже на порядок выше по сравнению с известными ранее из-за уменьшения полосы пропускания узлов рефлектометра.
2. При выявлении одной неоднородности в оптическом волокне с помощью программируемого делителя частоты возникает возможность более детального исследования отдельных участков волоконно-оптического тракта и высокой точности определения места расположения неоднородности.
3. Отсутствие широкополосных элементов в узлах устройства, реализующего метод ЧИР, позволяет использовать в нем дешевую элементную базу.