

## Введение

Характеристики передачи компонентов ВОСП При разработке волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) и усовершенствовании технологии их изготовления необходимо владеть соответствующими методиками измерения рабочих характеристик передачи оптических волокон, кабелей, соединителей и других пассивных компонентов. В статье рассмотрены методы измерения лишь основных параметров компонентов ВОСП. Будут рассмотрены методы измерения:

- числовой апертуры оптических волокон и кабелей;
- вносимых оптических потерь;
- полосы пропускания или дисперсии оптических волокон и кабелей;
- длины волны отсечки в одномодовых оптических волокнах и кабелях;
- хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах и кабелях;
- потерь на отражение в оптических соединителях;
- переходных затуханий в компонентах ВОСП;
- динамической нестабильности вносимых оптических потерь;
- коэффициента ошибок и других параметров передачи кодовых сообщений.

Кроме того, рассмотрены вопросы метрологической аттестации контрольно-измерительной аппаратуры.

## Особенности измерения параметров компонентов ВОСП, построенных на многомодовых оптических волокнах

Геометрические размеры многомодового волокна и профиль показателя преломления могут изменяться вдоль оси, причём дефекты могут быть локализованными или распределёнными. Сам материал волокна поглощает оптическое излучение, что приводит к уменьшению амплитуды полей, причём неодинаковому в сердцевине и оболочке, в связи с чем могут возникать дополнительные искажения. Различные неоднородности вызывают более или менее значительный обмен энергией между направлениями распространения света: это явление называется взаимодействием мод. Большая часть всех возможных мод оптических волокон являются модами распространения, но имеются моды излучения, а также моды потерь. Дефекты волокна могут служить причиной возникновения взаимодействия между модами распространения и паразитными модами и приводить тем самым к дополнительным искажениям характеристик передачи. Существуют и другие факторы влияющие на характеристики компонентов ВОСП: изогнутость волокна, рассеяние в волокне на микротрещинах или пузырьках, микроизгибы на поверхности волокна, образующиеся при его изготовлении или при изготовлении кабеля из волокна. Такие неоднородности, как правило, приводят к возникновению взаимодействия между модами распространения и паразитными модами и тем самым значительно усложняют интерпретацию результатов различных измерений. При наличии взаимодействия мод распределение энергии между модами и характеристики распространения стабилизируются на расстояниях до нескольких километров для высококачественных волокон. Характеристики передачи измеренные до достижения равновесия сильно зависят от условий ввода оптической волны в волокно и могут изменяться от измерения к измерению. Чтобы исключить такие эффекты и получить результаты, которые позволяли бы предсказывать поведение волокна на участке передачи, необходимо применение фильтров-смесителей мод.

Для формирования квазиравновесного распределения мод может быть использован фильтр-смеситель с оптическим волокном намотанным с механическим натяжением между роликами, расположенными на определённом расстоянии друг от друга. Существуют и другие конструкции фильтров-смесителей [1]. Наиболее эффективны фильтры-смесители выполненные в виде состыкованных друг с другом отрезков многомодового оптического волокна с различными профилями показателя преломления [2]. На рис. 1 представлена конструкция такого фильтра-смесителя из четырех отрезков оптического волокна.

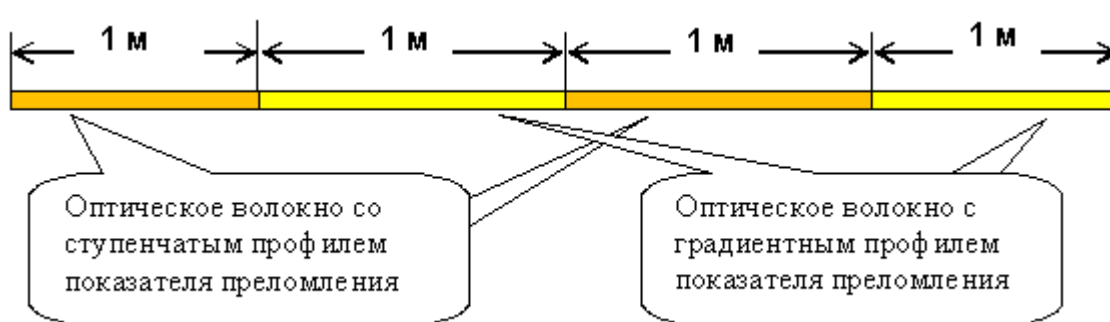


Рис. 1

### Особенности измерения параметров компонентов ВОСП, построенных на одномодовых оптических волокнах

Геометрические размеры одномодовых волокон таковы, что на рабочих длинах волн оптического диапазона в волокне может распространяться только одна мода. Однако, при вводе оптического излучения в волокно на начальном участке помимо основной моды возбуждаются оболочечные моды, распространяющиеся по кварцевой оболочке. Если не предпринимать дополнительных мер, оболочечные моды могут сохраняться на длине нескольких десятков

метров. Поэтому, при измерении характеристик компонентов ВОСП на одномодовых оптических волокнах, необходим фильтр оболочечных мод. Обычно это катушка небольшого радиуса (не менее 30 мм) с оптическим волокном длиной около сотни метров. За счёт изгибов волокна происходит фильтрация оболочечных мод.

**Литература:**

1. Wendiand Paul Fiber optic measurements. A review of recent methodology, IEEE Instrum. and Meas. Conf. Boulder, Colo March 25-27, - 1986, Conf. Rec., New York.

2. Хотяинцев Р.Н. Методы и средства измерения параметров волоконных световодов. Радиоэлектроника, 621-37/39, ч., М. 1985 г.

## Измерение числовой апертуры оптических волокон и кабелей

Числовая апертура оптического волокна определяется произведением показателя преломления среды на синус угла луча для которого интенсивность уменьшается в десять раз по сравнению с интенсивностью луча, распространяющегося вдоль оси волоконного световода, см. рис. 2.

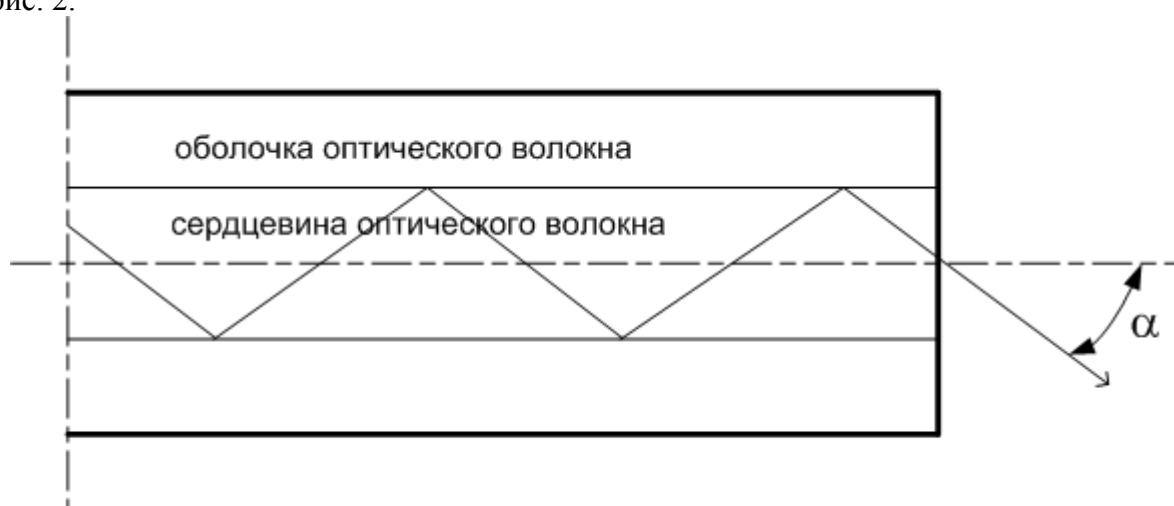


Рис. 2

Числовая апертура может быть измерена путём исследования распределения интенсивности оптического излучения в дальней зоне. Метод измерения изложен в [1] и основан на определении зависимости интенсивности излучения в дальней зоне (в элементе телесного угла) от угла между оптическими осями волокна и точечного фотоприёмника в плоскости, проходящей через эти оси. Фотоприёмник вращается вокруг торца оптического волокна, апертурный угол определяется на уровне 0,1 от максимального значения сигнала на выходе фотоприёмника. Для повышения чувствительности фотоприёмника, оптическое излучение как правило модулируют гармоническим сигналом. Структурная схема измерителя со сканирующим вокруг выходного торца волокна точечным фотоприёмником представлена на рис. 3.

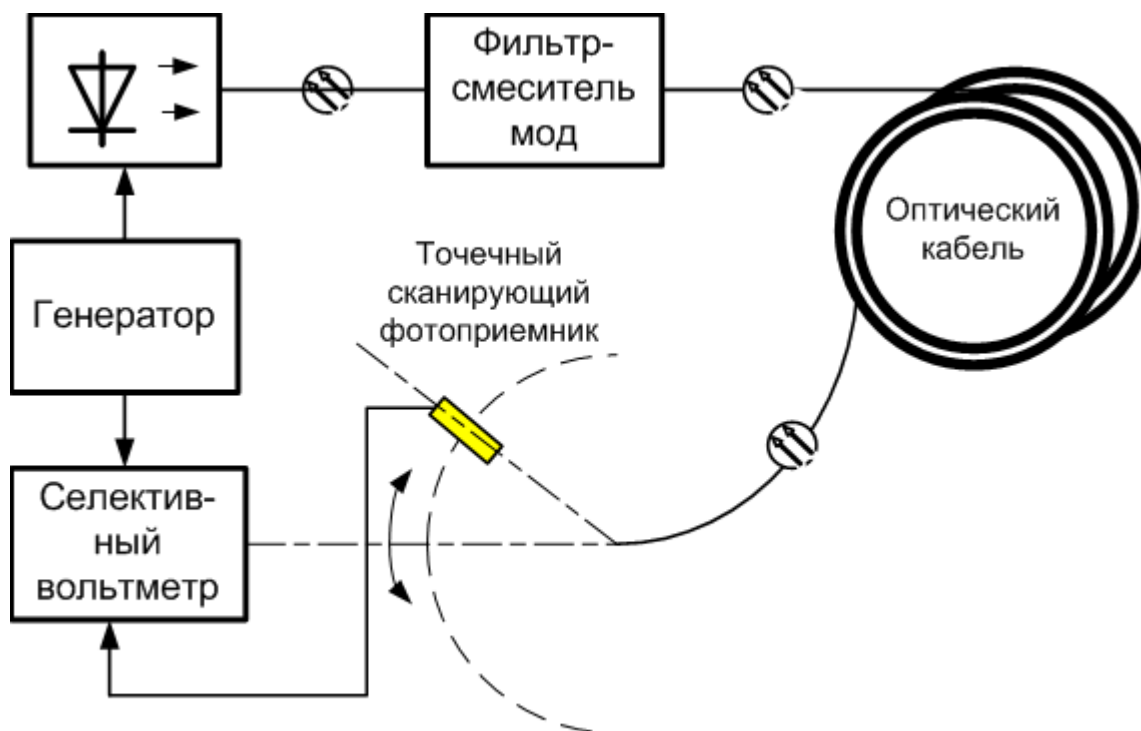


Рис. 3

Существенным недостатком рассмотренного метода является его ограниченность, связанная с возможностью проведением измерений лишь в одной плоскости конуса излучения волокна. Наличие сколов на торце оптического волокна может привести к ошибкам при проведении измерений. Для повышения достоверности измерения следует проводить в нескольких плоскостях, поворачивая выходной участок волокна (кабеля) вокруг оси, см. рис. 4

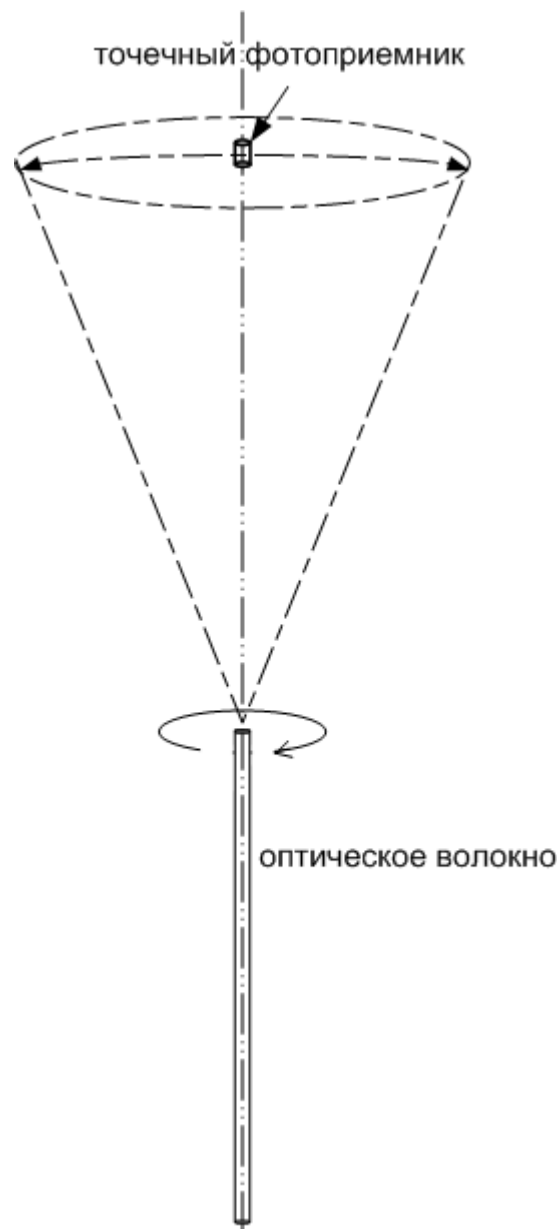


Рис. 4

Другим методом позволяющим измерить числовую апертуру оптических волокон и кабелей является метод заключающийся в том, что приемником излучения является телевизионная камера. Выделяя одну строку телевизионного сигнала можно на экране осциллографа или монитора зарегистрировать распределение интенсивности оптического излучения света вдоль выделенной строки (в одной плоскости конуса излучения). По виду полученной кривой можно рассчитать апертуру оптического волокна и оценить качество торца волокна. При реализации метода необходимо учитывать, что фоточувствительная поверхность передающей телевизионной трубки плоская. Реальное значение интенсивности излучения будет отличаться от измеренного и следует вводить поправку.

Апертурный угол оптического волокна (кабеля) определяется формулой:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{D_0}{2 \cdot L}\right)$$

здесь  $L$  - расстояние от фоточувствительной поверхности передающей телевизионной трубки до торца оптического волокна,  $D_0$  - диаметр засвеченной области передающей

телевизионной трубки при котором измеренная интенсивность оптического излучения будет равна:

$$I_o = \frac{0,1 \cdot I_{max} \cdot D_o}{2 \cdot L \cdot \sqrt{1 + (D_o/2L)^2}},$$

где  $I_o$  - измеренная интенсивность оптического излучения,  $I_{max}$  - максимальное значение интенсивности (см. рис. 5).

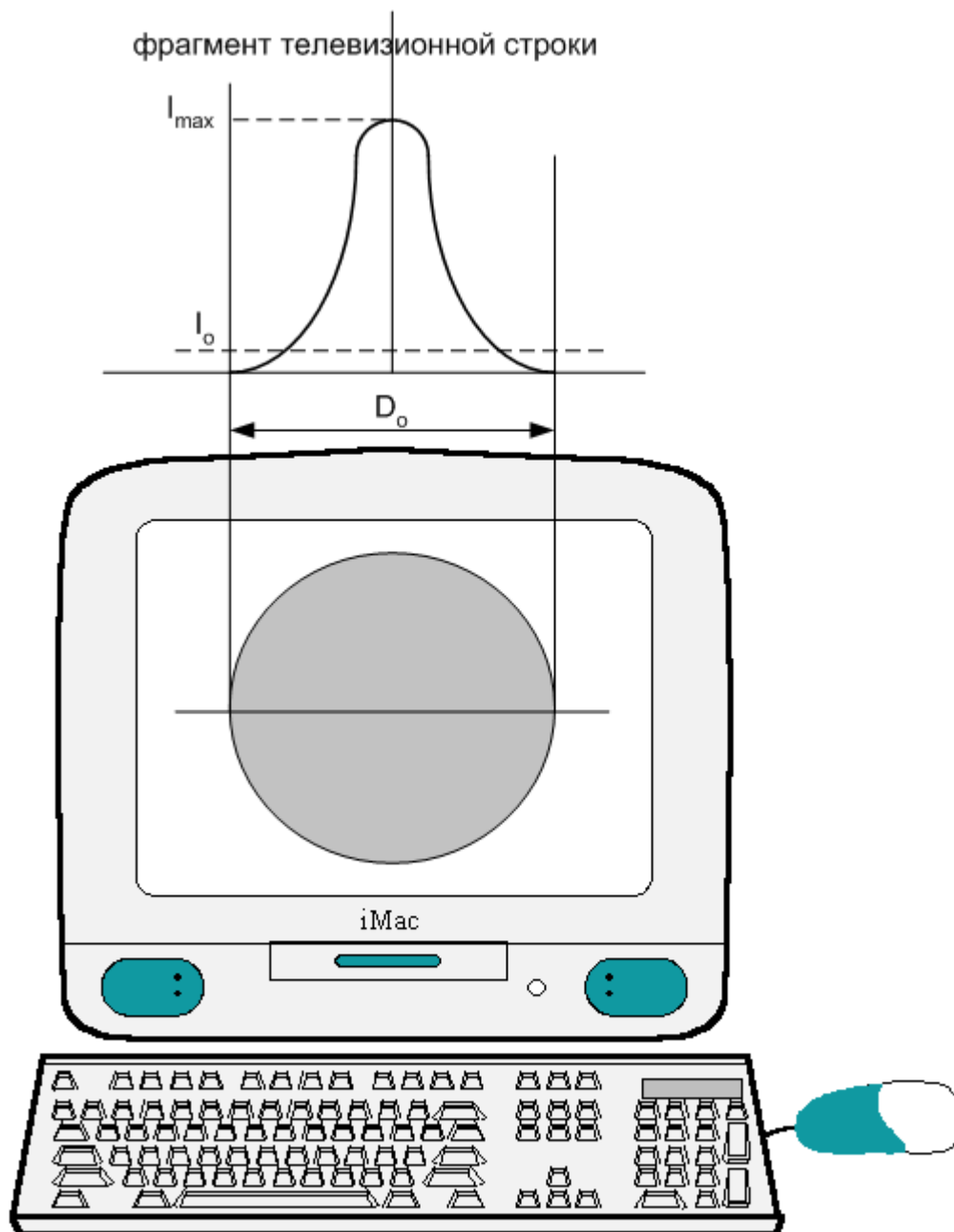


Рис. 5

Недостатком рассматриваемого метода является отсутствие стандартных промышленных телевизионных камер работающих на длинах волн оптического излучения более 0,9 мкм, как у нас в стране, так и за рубежом. Нестандартные специальные камеры на диапазон 1,3 мкм - 1,55 мкм очень дороги. Другим недостатком метода является невысокая точность измерений, связанная с неравномерностью чувствительности поверхности передающей телевизионной трубки.

Для обеспечения максимального согласования при передаче оптической энергии между источником излучения и волокном, либо между двумя разнородными волокнами, целесообразно измерять эффективную числовую апертуру. Эффективная числовая апертура определяется аналогично числовой апертуре, но критерием её оценки является изменение мощности в конусе излучения, а не изменение интенсивности в одной плоскости конуса.

Рассмотрим один из методов измерения эффективной числовой апертуры. Метод заключается в измерении мощности оптического излучения волокна фотоприёмником с большой чувствительной областью, перед активной площадкой которого установлена диафрагма [2]. Фотоприёмник перемещается вдоль оси волокна при этом измеряется расстояние ( $L$ ) от торца волокна до поверхности чувствительной области фотодиода, см. рис. 6.

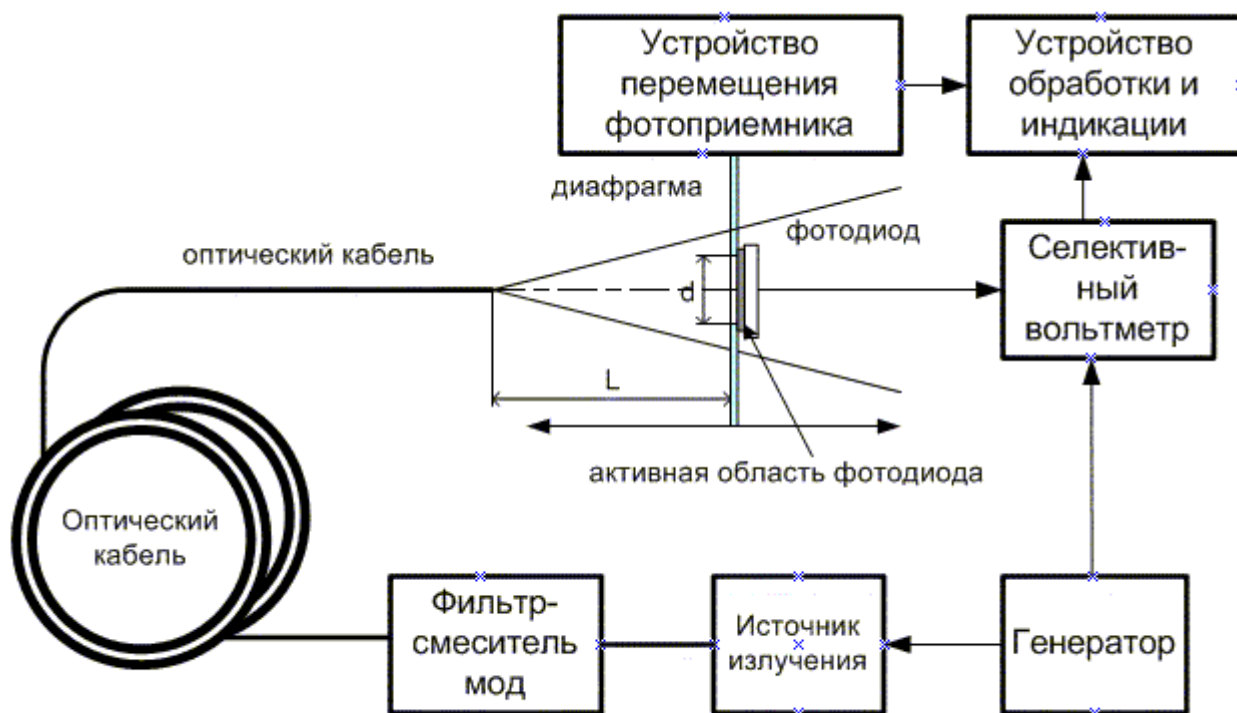


Рис. 6

Фиксируется расстояние  $L$ , при котором мощность оптического излучения волокна, фиксируемая фотоприёмником, уменьшается до уровня 0,9 от максимального значения с учётом поправки на то, что не все лучи попадают на активную область фотоприёмника под прямыми углами. Эффективная числовая апертура находится из формулы:

$$(NA)_{\text{эф}} = n \sin \alpha ,$$

где  $n$  - показатель преломления среды (для воздуха  $n=1$ ),  $\alpha$  - критический угол, который определяется из выражения:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{d}{L} \right) ,$$

где  $d$  - диаметр диафрагмы перед чувствительной областью фотоприёмника,  $L$  - расстояние от торца волокна до поверхности чувствительной области фотодиода, при котором мощность оптического излучения волокна, фиксируемая фотоприёмником, уменьшается до уровня 0,9 от максимального значения с учётом поправок.

Для повышения чувствительности фотоприёмника, оптическое излучение модулируют гармоническим сигналом. При использовании модулированного по интенсивности света для усиления сигнала с выхода фотодиода может быть использован узкополосный селективный усилитель, настроенный на частоту модуляции.



### **Литература:**

1. ГОСТ 26814-86 "Кабели оптические. Методы измерения параметров".
2. Чижов В.С., Истратов В.В. Измеритель эффективной числовой апертуры многомодовых волоконных световодов "Фотон 3-02". Труды всесоюзной конференции "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике", Нижний Новгород, 1991г., с.33-35.

## Измерение оптических потерь вносимых компонентами ВОСП

Метод измерения затухания в оптических волокнах и кабелях изложен в [1] и заключается в сравнении оптической мощности на выходе контролируемого отрезка и на выходе заменяющего его короткого отрезка волокна (кабеля). Короткий отрезок волокна образуется из контролируемого путём обрыва в начальной его части. При измерении необходимо обеспечить неизменность условий ввода и значений мощности оптического излучения на входе измеряемого отрезка волокна (кабеля).

При измерении вносимых потерь компонентов ВОСП с оптическими выводами в виде оптических кабелей, армированных оптическими соединителями, применяется метод, изложенный в [2]. Метод основан на последовательном измерении мощности оптического излучения на выходе измеряемого компонента и на выходе вспомогательного кабеля, армированного такими же соединителями.

Приборами, реализующими изложенные выше методы, являются измерители вносимых оптических потерь серии "Фотон", выпускаемыми ЗАО ЦНИТИ "Техномаш-ВОС". Основой этих приборов является базовая несущая конструкция (БНК). В БНК могут быть установлены следующие сменные модули:

- многомодовый передающий оптический модуль с длиной волны оптического излучения 0,85 мкм с блочной частью оптического соединителя FC/PC ("ЛЕВША -Ц") с долговременной нестабильностью мощности оптического излучения 0,01 дБ;
- многомодовый передающий оптический модуль с длиной волны оптического излучения 1,3 мкм с блочной частью оптического соединителя FC/PC ("ЛЕВША -Ц") с долговременной нестабильностью мощности оптического излучения 0,01 дБ;
- одномодовый передающий оптический модуль с длиной волны оптического излучения 1,55 мкм с блочной частью оптического соединителя FC/PC ("ЛЕВША -Ц") с долговременной стабильностью мощности оптического излучения 0,02 дБ;
- одномодовый передающий оптический модуль с длиной волны оптического излучения 1,3 мкм с блочной частью оптического соединителя FC/PC ("ЛЕВША -Ц") с долговременной стабильностью мощности оптического излучения 0,02 дБ;
- многомодовый передающий оптический модуль четырехканальный с длиной волны оптического излучения 1,3 мкм с блочными частями оптических соединителей "ЛИСТ-Ц" с долговременной нестабильностью мощности оптического излучения 0,02 дБ (для подключения полумуфт аппаратных полевого оптического кабеля П-294);
- многомодовый приемный оптический модуль на длины волн оптического излучения 0,85 - 1,55 мкм с блочной частью оптического соединителя "ЛИСТ-Ц";
- одномодовый приемный оптический модуль на длины волн оптического излучения 1,3 - 1,55 мкм с блочной частью оптического соединителя FC/PC ("ЛЕВША -Ц");
- многопортовый приемный оптический модуль на длины волн оптического излучения 0,85 - 1,55 мкм с блочными частями оптических соединителей FC/PC ("ЛЕВША -Ц"), "ЛИСТ-Ц", "ЛИСТ-3", ЛИСТ-Х";
- микропроцессорный модуль управления, обработки и индикации измеряемой информации.

Измерители "Фотон" (см. рис) могут быть использованы при долговременных видах испытаний компонентов ВОСП.



Рис. 7

Другим методом, позволяющим произвести измерение затухания оптических волокон и кабелей, а также оптических потерь, вносимых компонентами ВОСП, является метод временной рефлектометрии OTDR, изложенный в [2]. Метод основан на регистрации излучения обратного рассеяния.

Импульс сформированный устройством управления формирует при помощи источника оптического излучения зондирующий оптический импульс. Рассеянные назад оптические сигналы представляют собой Рэлеевское рассеяния и Френелевские отражения от различных участков волоконно-оптического тракта. Рэлеевское рассеяние обусловлено изменением показателя преломления из-за вариаций плотности и состава волокна, а Френелевское отражение возникает из-за скачков показателя преломления на соединителях, местах сварки и других неоднородностях.

Ответитель направляет излучение обратного рассеяния на фотоприёмник. Усиленный в импульсном усилителе сигнал фотоприёмника подаётся через электронный ключ на интегратор - накопитель. Электронный ключ открывается устройством управления через предварительно запрограммируемую линию задержки. Перепрограммируя линию задержки устройство управления выделяет составляющие сигнала для всех участков волоконно-оптического тракта, накапливает их и измеряет интегрированный отраженный сигнал при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Окончательная обработка измеренной информации производится в персональном компьютере. На экране монитора представляется вертикальная развёртка сигнала в зависимости от его мощности и горизонтальная временная развёртка. Затухание в волокне определяется по рефлектограмме - кривой амплитуды сигнала, спадающей слева (от входного конца волокна) направо (до выходного конца волокна). Соединитель или концевой скол волокна проявляются в виде увеличения амплитуды сигнала на экране в виде импульсов, при этом вклад эффекта Френелевского отражения в рассеянный назад сигнал значительно больше по сравнению с вкладом Рэлеевского рассеяния. Типичный вид рефлектограммы представлен на рис. 9.

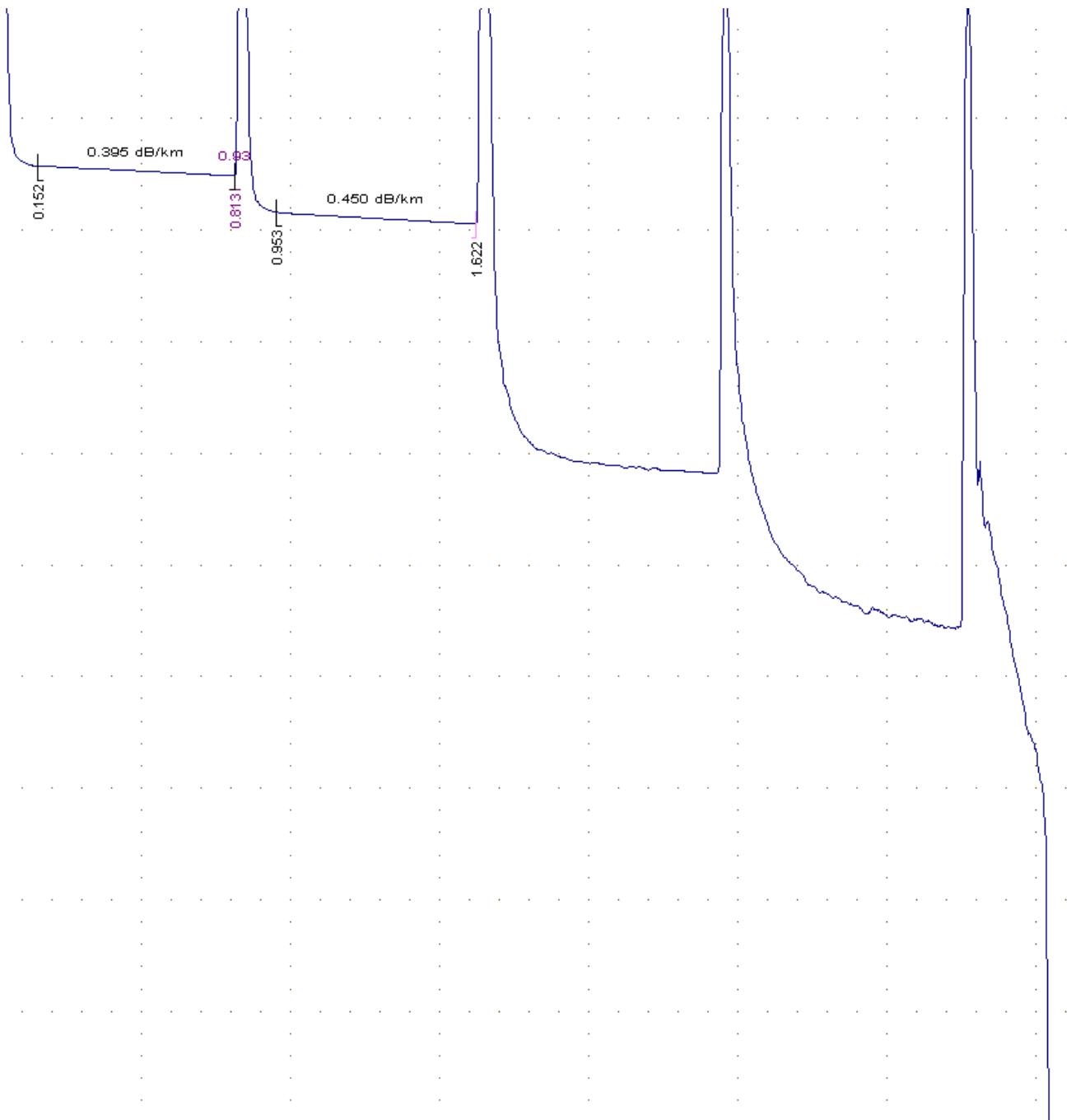


Рис. 9

Метод рефлектометрии обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими способами измерения затухания:

- измерения производятся на одном конце линии или с одного конца оптического волокна;
- возможность определения длины оптического волокна (кабеля), места положения локальных неоднородностей (например, трещин ОВ или изгибов малого радиуса).

К недостаткам импульсных рефлектометров можно отнести:

- низкая разрешающая способность при измерении расстояний, связанная с конечным значением длительности зондирующих импульсов;

- уменьшение длительности импульсов ведет к уменьшению динамического диапазона измерений, так как расширяется спектр измерительного сигнала, а следовательно уменьшается отношение сигнал - шум;
- увеличение мощности импульсов для увеличения динамического диапазона приводит к уменьшению надежности, так как быстрее наступает деградация кристалла лазера;
- низкая оперативность измерений связанная с необходимостью длительного накопления отраженных импульсов.

Свободны от перечисленных недостатков частотные рефлектометры [3]. Структурная схема частотного рефлектометра приведена на рис. 10.

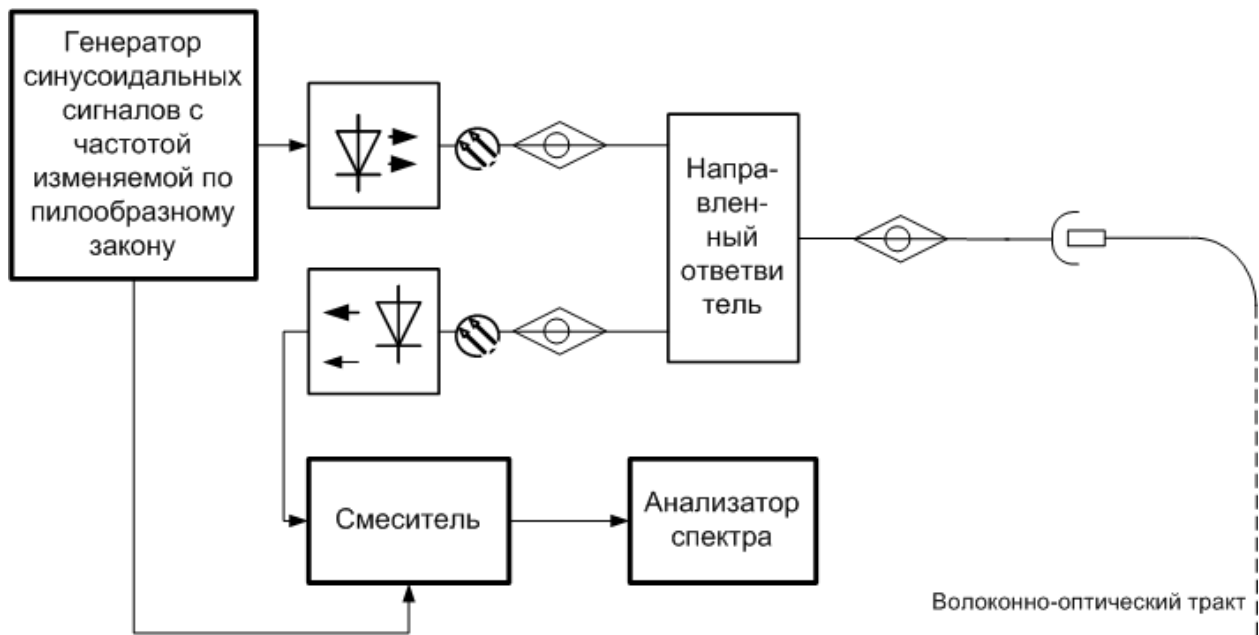


Рис. 10

Эпюры сигналов частотного рефлектометра представлены на рис. 11.

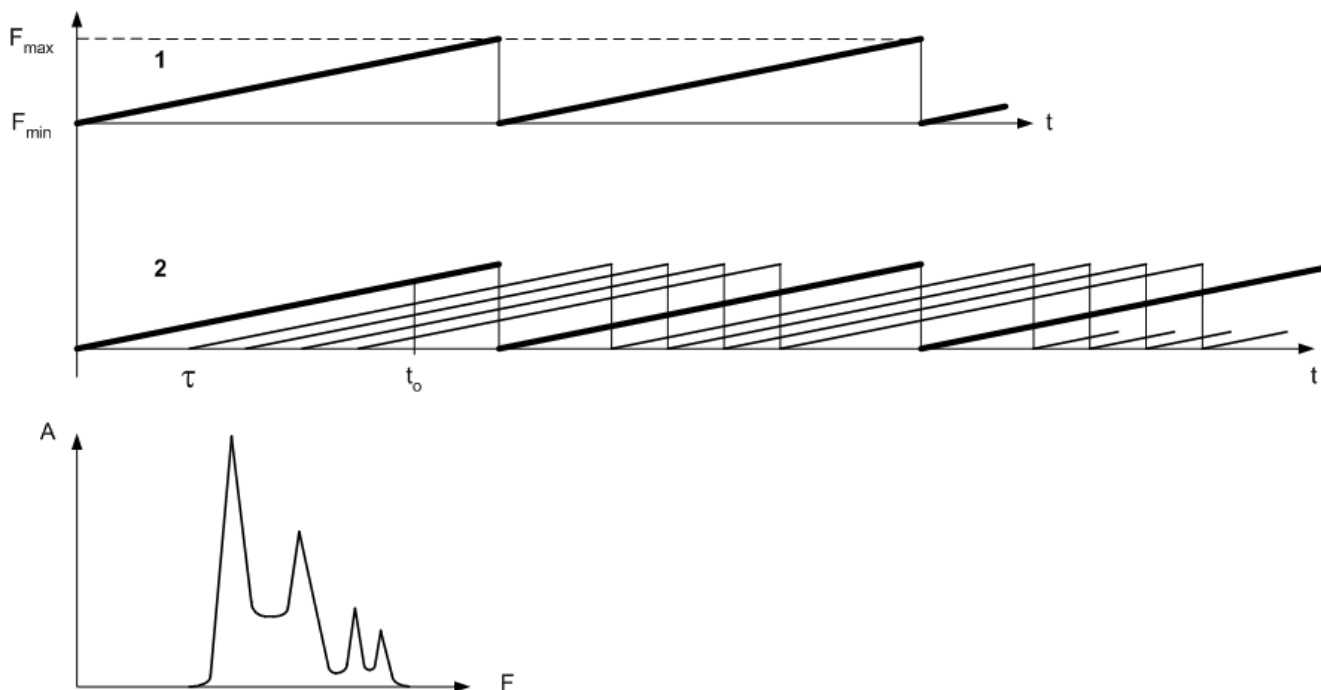


Рис. 11

1 - сигнал на выходе генератора модулирующего оптическое излучение,

2 - сигналы на входах смесителя, установленного на выходе фотоприемника. Жирной линией помечен сигнал на первом входе, тонкими на втором входе смесителя. На втором входе сигналы задержаны относительно модулирующего на время распространения оптического сигнала.

На третьей эпюре изображен спектр частот, получаемый на выходе смесителя в некоторый момент  $t_0$ . Спектр лежит в низкочастотной области и отражает задержки оптического сигнала в волоконно-оптическом тракте, по которым нетрудно определить места их расположения.

Частотные рефлектометры имеют много достоинств: узкий спектр измерительных сигналов, высокий динамический диапазон измерений, высокая надежность. В отличие от импульсных рефлектометров у них отсутствует накопление сигналов. Поэтому имеется возможность измерять нестабильность затухания оптического сигнала и изменение вносимых оптических потерь во время воздействия различных дестабилизирующих факторов: вибраций, механических ударов, импульсов радиации и т.д.

Изменения вносимых оптических потерь во время воздействия внешних факторов называется динамической нестабильностью вносимых потерь. Изменения вносимых оптических потерь могут быть очень незначительными, для повышения чувствительности средств измерения используют синхронное детектирование. Структурная схема измерителя динамической нестабильности вносимых оптических потерь изображена на рис. 12.

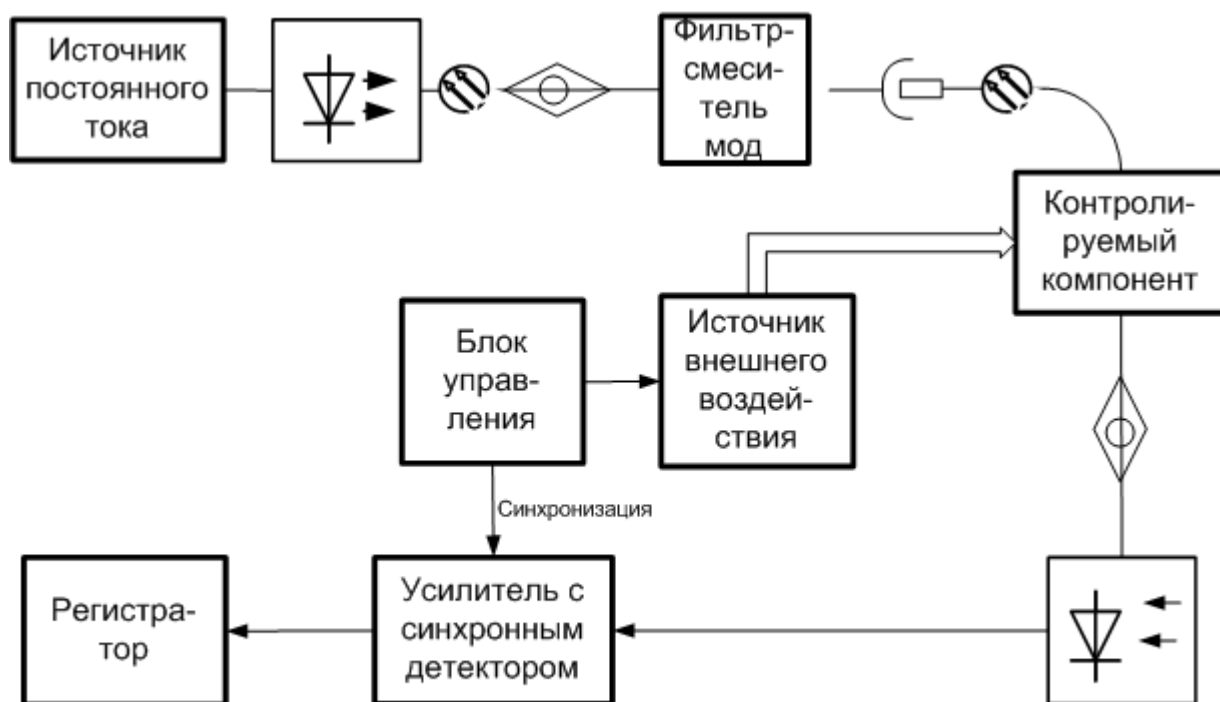


Рис. 12

Модулятором интенсивности оптического излучения является сам компонент, во время внешнего воздействия. Синхронизация усилителя, установленного на выходе фотоприемника, осуществляется от блока, управляющего испытательным стендом, имитирующим внешние воздействия.

#### Литература:

1. ГОСТ 26792-85 "Волокно оптическое. Методы измерения параметров".
2. ГОСТ 26814-86 "Кабели оптические. Методы измерения параметров".
3. Яковлев М.Я., Цуканов В.Н. Устройство для измерения характеристик оптических волокон. Авторское свидетельство на изобретение № 871014 от 8 июня 1981 г.

## Измерение полосы пропускания оптических волокон и кабелей

Ограничение полосы пропускания оптических волокон и кабелей связано с дисперсией времени распространения отдельных составляющих оптического сигнала. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами:

- различием скоростей распространения направленных мод (межмодовой дисперсией),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией),
- свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией).

Два последних вида дисперсии называются хроматической дисперсией. Два последних вида дисперсии называются хроматической дисперсией. Результирующая дисперсия определяется из формулы:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2} = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_{\text{w}})^2},$$

где  $\tau_{\text{mod}}$ - модовая дисперсия;

$\tau_{\text{chr}}$ - хроматическая дисперсия;

$\tau_{\text{mat}}$ - материальная дисперсия;

$\tau_{\text{w}}$ - волновая дисперсия.

При расчёте полосы пропускания можно воспользоваться формулой (см. п. 4.2.6.4 [1],  $W=0,44/t$ , где  $W$  - полоса пропускания в МГц км. Физический смысл  $W$  - это максимальная частота модуляции передаваемого сигнала при длине линии 1 км.

Разработано много методов измерения полосы пропускания оптических волокон и кабелей. Рассмотрим некоторые из них. На рисунке 13 представлена структурная схема измерителя полосы пропускания оптических волокон и кабелей [2]. Измеритель реализует метод прямых частотных измерений.



Рис. 13

Последовательно проводится два измерения полосы пропускания для короткого и длинного отрезков оптического волокна. Искомая полоса пропускания получается вычитанием из одной характеристики другой.

Примером реализации импульсного метода измерения полосы пропускания является структурная схема измерителя, представленная на рис. 14 [3.]



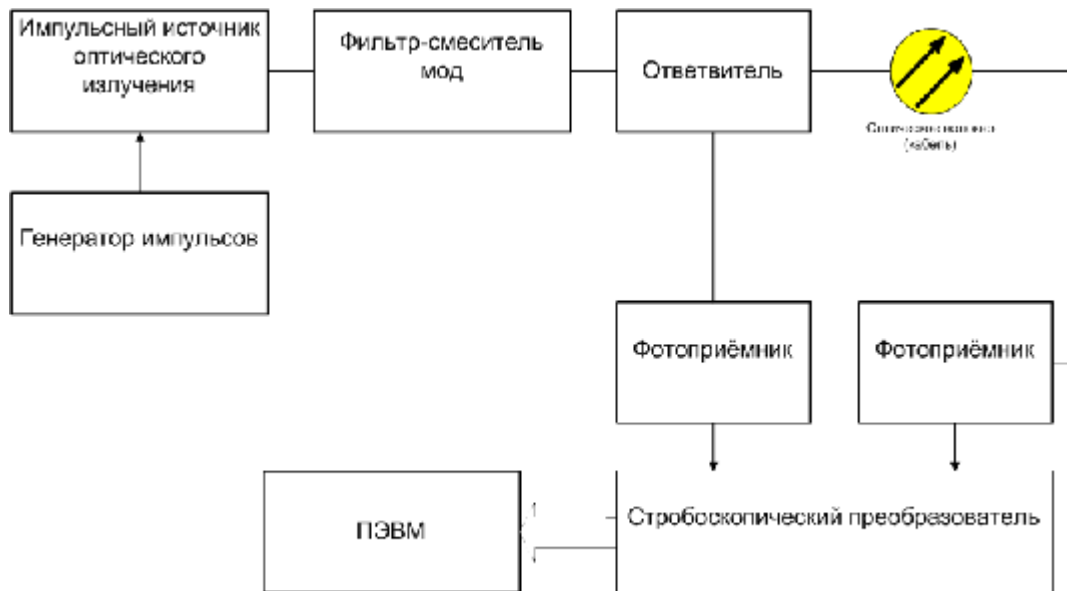


Рис. 14

Полоса пропускания оптического волокна рассчитывается исходя из анализа частотного спектра сигнала на входе оптического волокна и на его выходе.

#### Литература:

1. ГОСТ 26814-86 "Кабели оптические. Методы измерения параметров".
2. Климкова О.А., Наконечный В.Г., Цуканов В.Н. Измеритель широкополосности градиентных многомодовых волоконных световодов. Труды всесоюзной конференции "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике", Нижний Новгород, 1991г., с.33.
3. Алишев Я.В., Синкевич В.И., Урядов В.Н., Соборова И.Г., Томкович В.Ч. Прибор для измерения передаточных характеристик волоконных световодов. Труды всесоюзной конференции "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике", Нижний Новгород, 1991г., с.27-29.

## Измерение длины волны отсечки оптических волокон и кабелей

Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется длиной волны отсечки. Различают волоконную длину волны отсечки (1 CF) и кабельную длину волны отсечки (1 CCF). Первая соответствует слабо напряжённому волокну. На практике же волокно помещается в кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Это ведёт к подавлению побочных мод и смещению кабельной длины волны отсечки в сторону коротких длин волн.

Волоконную длину волны отсечки можно оценить как теоретически, так и экспериментально.

Для ступенчатого волокна:

$$\lambda_{CF} = \frac{\pi d \cdot NA}{2,405}$$

где  $d$  - диаметр сердцевины,  $NA$  - числовая апертура.

Кабельную длину волны отсечки можно оценить только экспериментально. Одним из практических методов измерений длин волн отсечки является метод передаваемой мощности. Сравнивается измеренная переданная спектральная мощность в зависимости от длины волны для образца одномодового волокна длиной 2м с аналогичным параметром, полученном на образце многомодового волокна.

Строится кривая

$$A_M(\lambda) = 10 \cdot \lg \frac{P_S(\lambda)}{P_M(\lambda)} \text{ дБ,}$$

где  $A_M$  - разница затуханий;  $P_S$  - мощность на выходе одномодового волокна;  $P_M$  - мощность на выходе многомодового волокна;  $\lambda$  - длина волны оптического излучения.

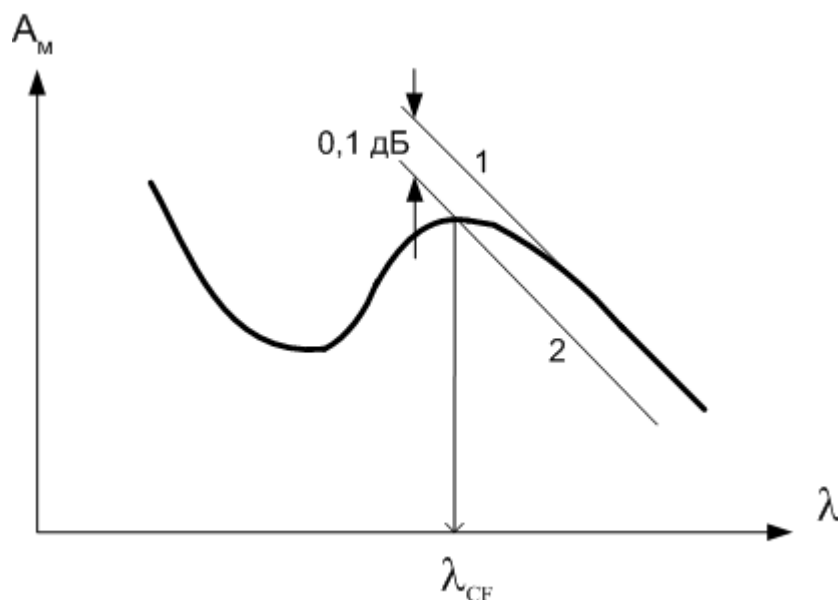


Рис. 15

Многомодовое волокно в данном случае является эталонным. При этом один и тот же источник излучения с перестраиваемой длиной волны используется как для одномодового, так и для многомодового волокна. Строится кривая, представленная на рис.15, длинноволновый участок которой экстраполируется прямой (1). Строится параллельная прямая (2), отстоящая

ниже от (1) на 0,1 дБ. Точка пересечения прямой (2) с кривой  $A_m(l)$  соответствует длине волны отсечки.

Условия измерения должны соответствовать рекомендациям ТИА/ЕІА и ССІТТ. Концы волокна очищаются от защитного покрытия, скалываются - угол скола не должен превышать 2 градуса. Диаметр светового пятна от источника излучения - 200 мкм, числовая апертура вводимого излучения 0,2; полная ширина спектра излучения измеренная на полумаксимуме не более 10 нм, изменяемый диапазон длин волн от 1000 нм до 1600 нм с шагом 10 нм.

При измерении длины волны отсечки волокна І CF, образец волокна должен иметь длину 2 м и располагаться таким образом, чтобы образовывалась одна петля радиусом 140 мм, рис. 16. Не должно быть дополнительных изгибов волокна с радиусом, меньшим 140 мм.

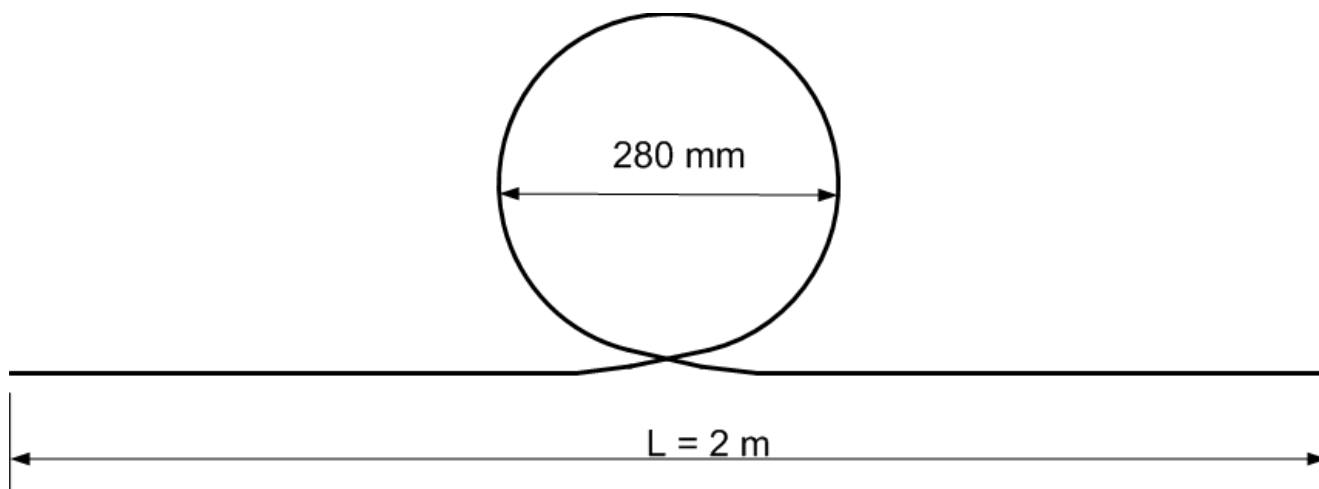


Рис. 16

При измерении кабельной длины волны отсечки тестируемый образец волокна должен иметь длину более 22 м. Большая часть волокна свёртывается и располагается на катушке с радиусом не меньше, чем 140 мм, что моделирует кабельные эффекты. Затем делается по одной петле диаметром 76 мм на расстоянии 1 м от каждого конца волокна для моделирования эффекта изгиба волокна. В средней части делается две дополнительные петли радиусом 140 мм, см. рисунок 17.

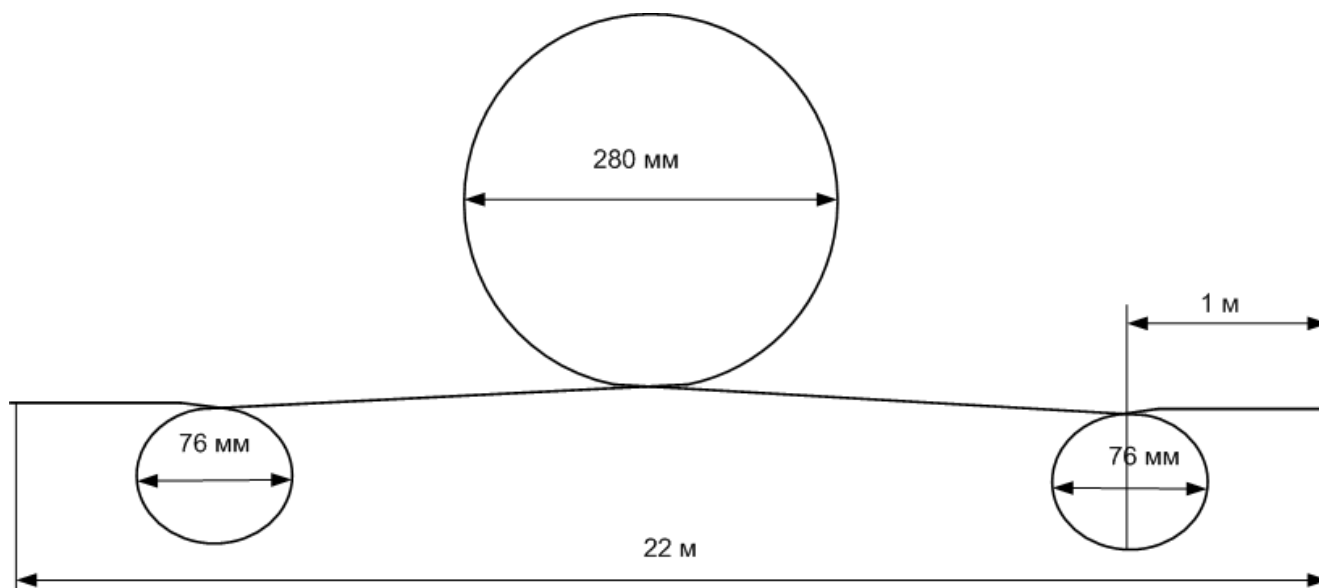


Рис. 17

Структурная схема измерителя длины волны отсечки представлена на рис. 18.

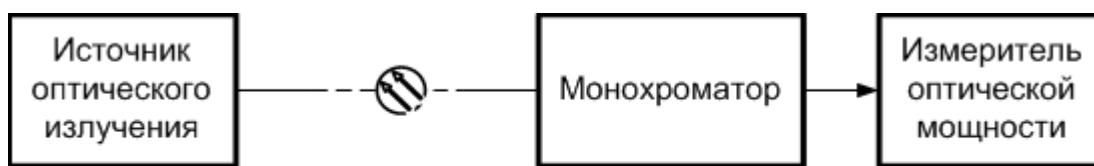


Рис. 18

Источник оптического излучения должен перекрывать оптический диапазон от 800 до 1800 нм, обычно состоит из трёх излучателей. Разрешение монохроматора должно быть не менее 1 нм во всем рабочем диапазоне длин волн.

### Измерение хроматической дисперсии

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления ОВ от длины волны оптического излучения. В выражение для материальной дисперсии входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda).$$

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны:

$$\tau_w(\Delta\lambda \cdot L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \cdot \frac{\Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda),$$

здесь введены коэффициенты М и N - удельные материальная и волновая дисперсии соответственно, а  $\Delta l$  (нм) - уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как  $D=M+N$ . Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. Важным является то, что при определённой длине волны происходит взаимная компенсация М и N, а результирующая дисперсия обращается в ноль. Длина волны на которой это происходит называется длиной волны нулевой дисперсии. Разработано несколько методов измерения хроматической дисперсии. Наибольшее распространение получил метод, заключающийся в следующем:

- Измеряются задержки распространения оптического излучения в контролируемом отрезке ОВ длиной не менее 1 км для нескольких длин волн в диапазоне 1200 - 1600 нм. Калибровку измерителя проводят на коротком отрезке ОВ длиной около 1 метра.
- По результатам измерений методами экстраполяции, используя эмпирическую формулу Сел Мейера
 
$$\tau(\lambda) = A + B \cdot \lambda^2 + C\lambda^{-2}$$
 находят коэффициенты А, В, С.
- Находят хроматическую дисперсию по следующей формуле:

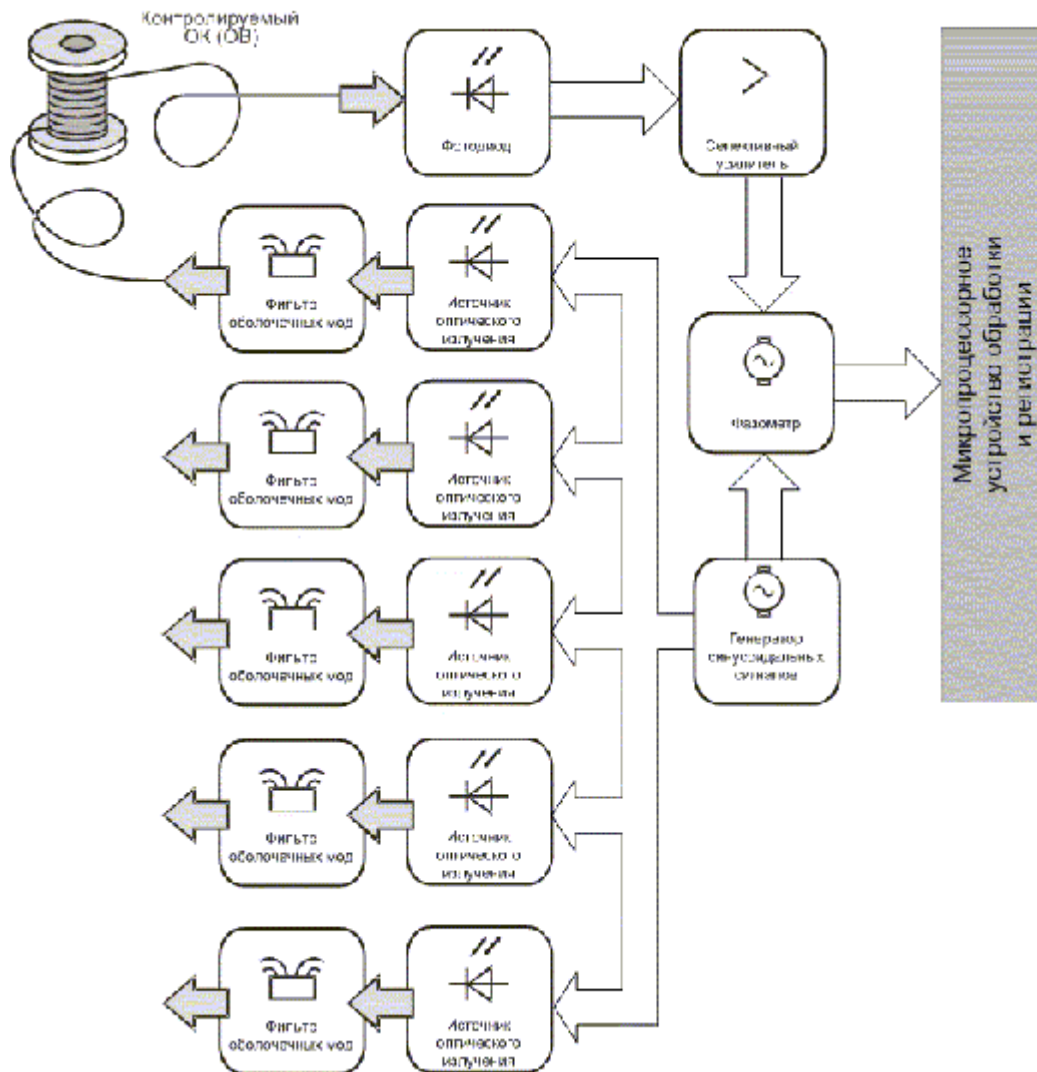
$$D(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_o \left( \lambda - \frac{\lambda_o^4}{\lambda^3} \right) / 4,$$

где длина волны нулевой дисперсии

$$\lambda_0 = \left( \frac{C}{B} \right)^{1/4},$$

$S_0 = 8B$  - наклон нулевой дисперсии.

Структурная схема измерителя, реализующего метод представлена на рисунке.



В измерителе применены пять источников оптического излучения отличающиеся длиной волны на 15 нм. Временные задержки определяются по фазовому сдвигу сигнала на выходе фотоприёмника. Сигнал представляет собой оптическое излучение, модулированное по интенсивности синусоидальным напряжением. Для ОВ со смещённой дисперсией эмпирическая формула зависимости временных задержек от длины волны излучения выглядит следующим образом:

$$\tau(\lambda) = A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda \cdot \ln \lambda,$$

а соответствующая удельная дисперсия определяется как

$$D(\lambda) = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = B + C + C \ln \lambda = \lambda_0 S_0 \ln(\lambda / \lambda_0),$$

со значениями параметров

$$\lambda_0 = e^{-(A+B/C)} \text{ и } S_0 = \frac{C}{\lambda_0}, \text{ где } \lambda_0 - \text{длина волны нулевой дисперсии, } S_0 - \text{наклон нулевой дисперсии.}$$

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией соотношением

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \text{ где } \Delta\lambda - \text{ширина спектра излучения.}$$

Измерение переходных затуханий компонентов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП)

Переходные затухания в компонентах ВОСП - определяются отношением мощности оптического излучения во входном полюсе компонента ВОСПИ к мощности оптического излучения в других не связанных с ним полюсах.

Для многополюсных оптических соединителей - это мощность в полюсах не подключённых к источнику света, при передаче оптических сигналов по одному из каналов. Для оптических переключателей - это мощность в полюсах выключенных каналов и т.д.

Методы измерения переходных затуханий аналогичны методам измерения вносимых оптических потерь. Предъявляются иные требования к измерительной аппаратуре, т. к. значение переходных затуханий может достигать 80 и более дБ. Для усиления измерительного сигнала, преобразованного фотоприёмником, используется, как правило, узкополосный усилитель с синхронным детектором. Эквивалентная полоса пропускания такого усилителя составляет доли герц, а коэффициент усиления свыше 120 дБ.