

## Лабораторная работа\_1

### Измерение основных параметров оптического волокна

**Цель работы:** Изучение физических параметров оптического волокна по прямым геометрическим и оптическим измерениям, которые демонстрируют структуру оптического волокна, что позволяет понять назначение и физический смысл вводимых физических параметров.

#### Описание

Передача оптического излучения в кабельных системах производится по световодам - оптическим волокнам (optical fiber, OF), представляющие гибкий оптический волновод в виде тонкой нити из оптически прозрачного материала, в котором свет направляется сердцевинной. Направляющие свойства оптического волокна обусловлены полным внутренним отражением света на границе между сердцевинной и оболочкой, в которой показатель преломления сердцевины больше, чем показатель преломления оболочки. В зависимости от диаметра сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки, волокна делятся на два основных типа: многомодовые (multi mode fiber, MMF) и одномодовые (single mode fiber, SMF).

Наиболее распространенный класс оптических волокон представляет собой тонкую кварцевую нить, профиль показателя преломления (refractive index profile, RIP) сердцевины которой имеет ступенчатый вид (step index, SI). Одномодовые кварцевые волокна обладают уникально малыми потерями  $\sim 0,16$  дБ/км на длине волны = 1,55 мкм. В оптических сетях доступа и локальных сетях связи используются также более простые в эксплуатации многомодовые полимерные оптические волокна.

Основная область применений оптических волокон — оптические телекоммуникации. Параметры телекоммуникационных волокон регламентируются международными стандартами: G.652, G.653, G.655 и др.

Для всех типов телекоммуникационных волокон диаметр кварцевой оболочки имеет стандартный размер 125 мкм (см. рис.1). В градиентных (gradient index, GI) многомодовых волокнах диаметр сердцевины может принимать два значения: 50 или 62,5 мкм. В стандартных одномодовых волокнах нормируемым параметром является диаметр модового пятна. Другими важнейшими характеристиками оптических волокон являются оптические потери, хроматическая и поляризационная модовая дисперсия, оптическая нелинейность и механическая прочность.

Оптические волокна применяются также для передачи мощного лазерного излучения в технологических и медицинских применениях; в волоконно-оптических датчиках; устройствах обработки оптических сигналов и т. д. В этих приложениях наряду со стандартными телекоммуникационными

волокнами используются волокна специального назначения. В них диаметр сердцевины может изменяться от нескольких мкм до сотен мкм.

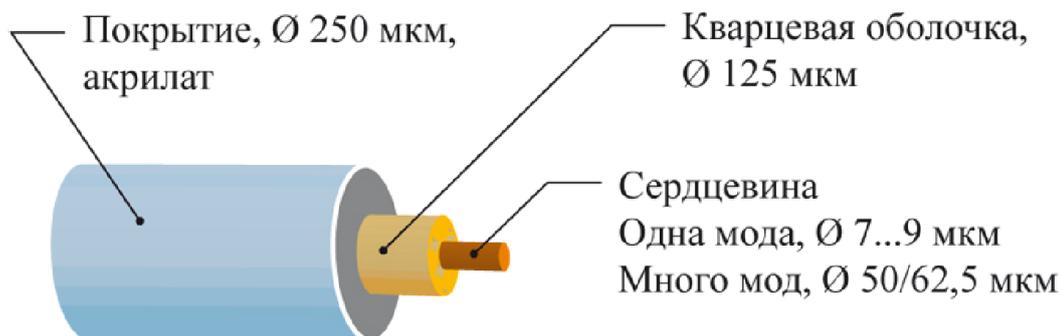


Рис.1. Структура стандартных телекоммуникационных волокон

### Геометрические и оптические параметры оптических волокон

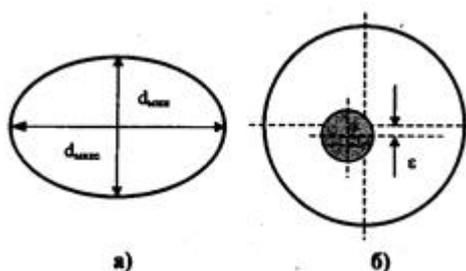


Рис.2. Примеры неоднородностей в оптических волокнах: а – некруглость; б – неконцентричность сердцевины и оболочки ОВ

Основными геометрическими параметрами оптических волокон являются:

- диаметр сердцевины;
- диаметр оболочки;
- диаметр защитного покрытия;
- некруглость (эллиптичность) сердцевины;
- некруглость оболочки;
- неконцентричность сердцевины и оболочки.

Некруглость сердцевины оптического волокна определяется как разность максимального и минимального диаметров сердцевины, деленная на номинальный диаметр сердцевины, и определяется только в многомодовых волокнах, некруглость оболочки — в многомодовых и одномодовых волокнах. Некруглость сердцевины оптического волокна (рис. 2а) определяется из выражения:

$$H_c = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{d_n} \quad (1)$$

где  $H_c$  — некруглость сердцевины, %;  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  — наибольший и наименьший диаметр сердцевины, мкм, соответственно;  $d_n$  — номинальный диаметр сердцевины, мкм.

Некруглость оболочки оптического волокна определяется аналогично.

Неконцентричность сердцевины относительно оболочки определяется как расстояние между центрами оболочки и сердцевины оптического волокна (рис. 2б) и определяется из выражения:

$$H_{c/o} = C_o - C_c \quad (2)$$

где  $H_{c/o}$  — неконцентричность сердцевины относительно оболочки, мкм;  $C_c$  — координаты центра сердцевины, мкм;  $C_o$  — координата центра оболочки, мкм.

Геометрические параметры стандартизированы для разных типов оптических волокон, поэтому остановимся более подробно на оптических параметрах волокон.

Основными оптическими параметрами волокна являются:

- относительная разность показателей преломления ( $\Delta$ );
- числовая апертура (NA);
- нормированная частота (V);
- число распространяющихся мод (M);
- диаметр модового поля ( $d_{mf}$ );
- длина волны отсечки (критическая длина волны  $\lambda_{cr}$ ).

**Относительная разность показателей преломления.** Относительная разность показателя преломления сердцевины и оболочки оптического волокна определяется выражением

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (3)$$

здесь  $n_1$  - показатель преломления сердцевины,  $n_2$  - показатель преломления оболочки оптического волокна

**Числовая апертура.** Одной из основных характеристик, определяющих условия ввода оптических сигналов и процессы их распространения в оптических волокнах, является числовая апертура, определяемая для:

- оптических волокон со ступенчатым профилем показателя преломления сердцевин

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4)$$

- оптического волокна с градиентным профилем показателя преломления

$$NA = \sqrt{\frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2}} \quad (5)$$

В градиентных оптических волокнах используется понятие локальной числовой апертуры. Ее значение максимально на оси волокна и равно 0 на границе раздела *сердцевина — оболочка*.

**Нормированная частота.** Этот параметр, определяющий число мод, равен:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (6)$$

где  $\lambda$  — длина волны, мкм,  $d=2a$  — диаметр сердцевин, мкм.

Если  $0 < V < 2,405$ , то режим работы волокна одномодовый, если  $V > 2,405$  — многомодовый. Чем меньше диаметр сердцевин оптического волокна, тем меньшее число мод может распространяться по нему и тем меньшее расширение получают оптические импульсы. Соответственно увеличивается коэффициент широкополосности волокна. Таким образом, одномодовое оптическое волокно может передавать более широкополосные сигналы, чем многомодовое оптическое волокно.

#### **Число мод в многомодовом оптическом волокне.**

Общее число мод в многомодовом оптическом волокне с диаметром сердцевин  $2a$ , заданной числовой апертурой на рабочей длине волны  $\lambda$  определяется через нормированную частоту выражением вида:

$$M \approx \begin{cases} V^2/2 & \text{for } \textit{step-RIP} \\ V^2/4 & \text{for } \textit{grad-RIP} \end{cases} \quad (7)$$

где RIP (refractive index profile) - профиль показателя преломления.

В расчетах  $M$  может оказаться дробным числом, в то время как число мод в волокне бывает только целым и составляет от одной до тысячи мод. В волокне с градиентным профилем показателя преломления и теми же значениями диаметра сердцевин, показателей преломления  $n_1$  и  $n_2$  число мод примерно в 2 раза меньше, чем в оптических волокнах со ступенчатым

профилем показателя преломления. Количество мод (с учетом всех вырожденных мод) в случае градиентного профиля показателя преломления определяется выражением вида:

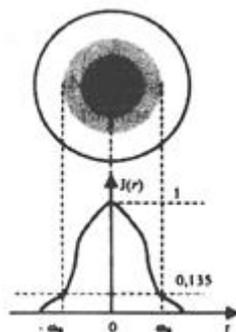
$$M = \frac{V^2}{1(1+2/u)^2} \quad (8)$$

где  $u$  — показатель степени, описывающий изменения профиля показателя преломления.

### Диаметр модового поля в одномодовом оптическом волокне.

Важным интегральным параметром одномодового оптического волокна является диаметр модового поля. Этот параметр используется при анализе одномодовых волокон.

В многомодовых оптических волокнах размер сердцевинки принято оценивать диаметром ( $d=2a$ ), в одномодовых волокнах — с помощью диаметра модового поля ( $d_{mf}$ ). Это связано с тем, что энергия основной моды в одномодовом оптическом волокне распространяется не только в сердцевине, но и частично в оболочке, захватывая ее приграничную область. Поэтому  $d_{mf}$  более точно оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды. Величина  $d_{mf}$  является важной при стыковке волокон между собой, а также при стыковке источника излучения с волокном.



*Рис. 3. Зависимость распределения интенсивности излучения основной моды одномодового оптического волокна в ближней зоне от радиуса*

Зависимость распределения интенсивности (мощности) излучения основной моды одномодового волокна в ближней зоне от радиуса (рис. 3). Эта зависимость аппроксимируется с достаточной степенью точности формулой Гаусса:

$$J(r) = J_0 \exp\left(-\frac{r}{W_0}\right)^2 \quad (9)$$

где  $J(r)$  — интенсивность излучения на расстоянии  $r$  от оси ООВ;  $J_0$  — интенсивность излучения на оси одномодового оптического волокна (при  $r=0$ );  $W_0$  — радиус модового поля, т. е. значение радиуса, при котором интенсивность излучения составляет  $1/e^2 = 0,35J_0$ .

Радиус поля моды  $W_0$  в микрометрах определяется при известных значениях  $V$  и  $a=d/2$  из соотношения

$$W_0 = a \left( 0,65 + 1,619 \cdot V^{-3/2} + 2,879 \cdot V^{-6} \right) \approx a \left( 0,65 + 1,62 \cdot V^{-3/2} \right) \quad (10)$$

Тогда искомое значение диаметра модового поля равно  $d_{mf} = 2W_0$ .

**Длина волны отсечки в одномодовом оптическом волокне.** Минимальная длина волны, при которой оптическое волокно поддерживает только одну распространяющуюся моду, называется длиной волны отсечки. Этот параметр характерен для одномодового оптического волокна. Если  $\lambda_{cr}$  меньше, чем длина волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения света.

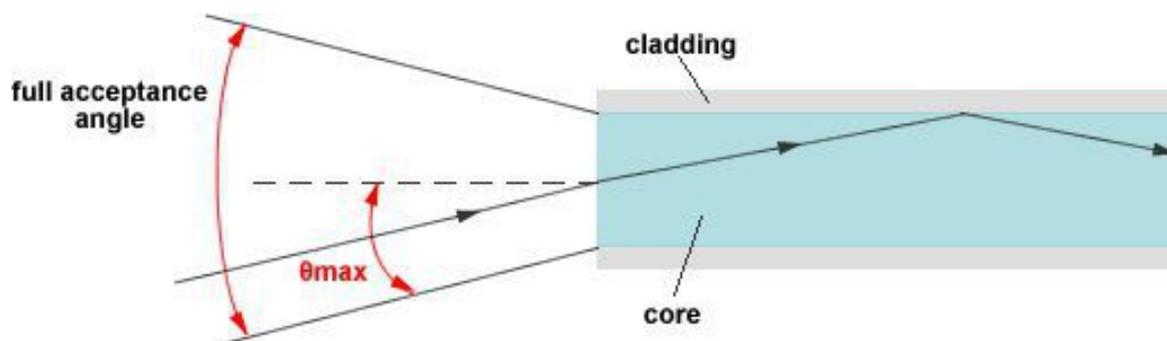
Различают длину волны отсечки в волокне  $\lambda_c$  и длину волны отсечки в проложенном кабеле  $\lambda_{cc}$ . Первая ( $\lambda_c$ ) соответствует слабо напряженному волокну и для ступенчатого одномодового оптического волокна она определяется выражением вида:

$$\lambda_c = 2\pi a \frac{NA}{2,405} \quad (11)$$

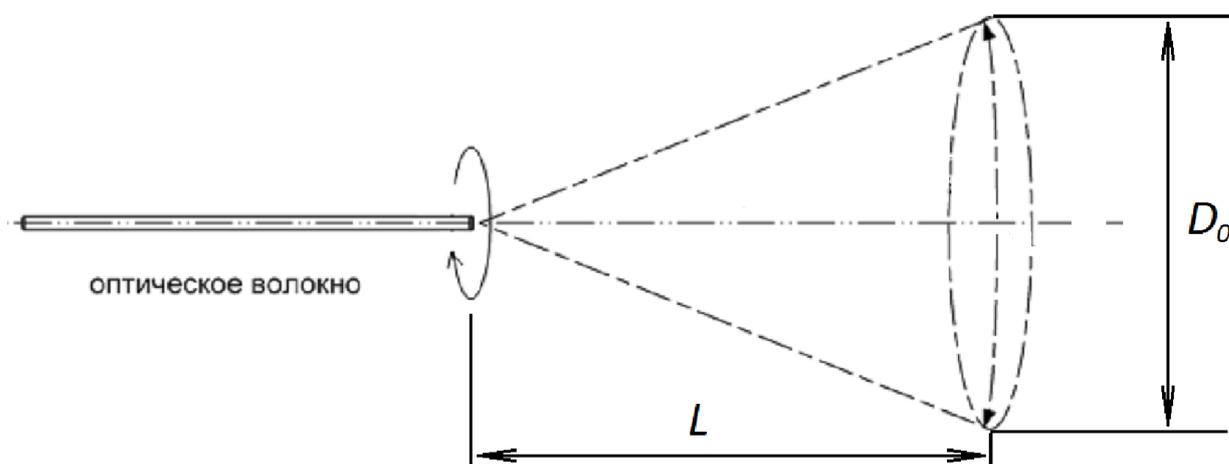
Длина отсечки в проложенном кабеле  $\lambda_{cc}$  соответствует напряженному оптическому волокну. На практике оптическое волокно в проложенном или подвешенном на опорах кабеле имеет большое число изгибов. Кроме того, сильные искривления имеются в оптических волокнах, уложенных в кассеты муфт и промежуточных соединителях на объектах связи (сплайс-боксах). Все это ведет к подавлению побочных мод и сдвигу  $\lambda_{cc}$  в сторону коротких длин волн в сравнении с  $\lambda_c$ . Разницу между  $\lambda_{cc}$  и  $\lambda_c$  можно оценить только экспериментальным путем.

## Экспериментальная установка.

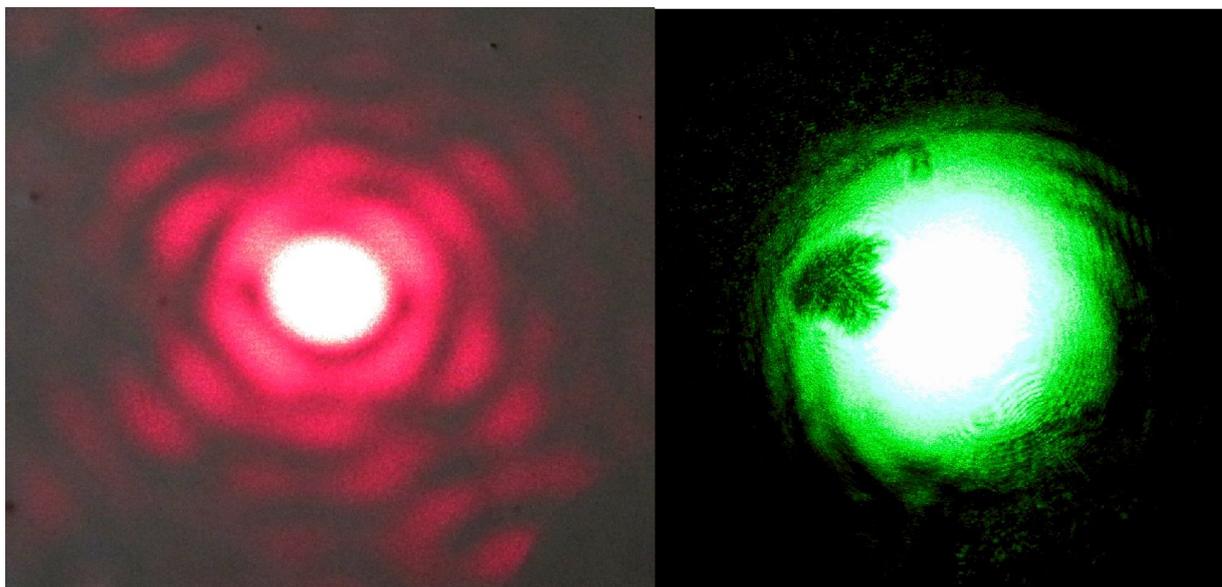
Геометрия лучей на входе света и при распространении в сердцевине в ОВ



Геометрия эксперимента по измерению параметров выходного конуса оптического луча



Вид лазерного луча



Апертурный угол оптического волокна (кабеля) определяется формулой:

$$\theta_{\max} = \operatorname{arctg}\left(\frac{D_0}{2 \cdot L}\right), \quad (12)$$

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

Числовая апертура оптического волокна вычисляется по формуле

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{\max}, \quad (13)$$

где  $n_0$  - показатель преломления среды вблизи торца оптического волокна.

Измерение диаметра сердцевины производится с помощью микроскопа.

## Порядок выполнения работы

**Упражнение 1.** Изучение работы экспериментальной установки и наблюдение модового состава излучения многомодового волокна.

Подсоединить оптическое волокно к источнику видимого излучения (атор дефектов VFL-250 с длиной волны видимого красного излучения 650 нм);

Вывести излучение на экран (белый лист бумаги) и наблюдать структуру выходящего оптического поля;

Получить одномодовое и многомодовое излучение, путем манипуляций с оптическим волокном.

**Упражнение 2.** Измерение геометрических параметров выходного оптического излучения.

Вывести излучение на экран, получить однородное оптическое поле;

Разместить торец волокна на расстоянии  $L$  от экрана и измерить диаметр выходного модового поля  $D$ , предварительно обведя его на экране карандашом, результаты занести в таблицу:

Номер измерения $i$	Расстояние от экрана $L$ , мм	Диаметр светового поля $D$ , мм	Числовая апертура $NA$
1	30		
2	50		
3	70		
4	90		
5	110		

Для каждого измерения вычислить числовую апертуру  $NA_i$  по формулам

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{\max}, \text{ при } \theta_{\max} = \arctg\left(\frac{D_0}{2 \cdot L}\right) \text{ и } n_0=1 \text{ (воздух),}$$

вычислить среднее значение  $\langle NA \rangle$ , абсолютную погрешность измерения  $\Delta NA$  и относительную погрешность измерения  $E_{NA} = \Delta NA / \langle NA \rangle$ .

Результаты измерения представить в виде

$$NA = \langle NA \rangle \pm \Delta NA (E_{NA}, \%).$$

**Упражнение 3.** Измерение диаметра оболочки и сердцевины волокна с помощью микроскопа.

Откалибровать микроскоп по микрометрическому эталону;

Поместить волокно торцом в поле наблюдения микроскопа, наблюдать поперечную структуру волокна, определить профиль показателя преломления;

Измерить диаметр сердцевины  $d=2a$  или принять значение  $d=2a=10$  мкм.

**Упражнение 4.** Обработка результатов измерений.

На основе экспериментально полученной в упражнении 2 числовой апертуры

$$NA = \langle NA \rangle \pm \Delta NA \quad (E_{NA}, \%)$$

определить

- нормированную частоту

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

где  $\lambda=0,650$  мкм — длина волны,  $d=2a=10$  мкм — диаметр сердцевины.

- длину волны отсечки в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления

$$\lambda_c = 2\pi a \frac{NA}{2,405}$$

- тип волокна

одномодовое или многомодовое волокно.

- число мод в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления

$$M \approx \frac{V^2}{2}$$

Написать выводы о проделанной работе, где указать полученные параметры оптического волокна

## Контрольные вопросы

1. Структура оптического волокна и его характерные размеры
2. Оптические характеристики оптического волокна
3. Что определяет числовая апертура волокна
4. Какие волокна называются одно- и многомодовым волокном, отчего зависит число мод в волокне.

## Дополнительные вопросы

5. По какому признаку световоды подразделяются на одномодовые и многомодовые?
6. Почему одномодовые оптические волокна применяются для организации каналов дальней связи?
7. Что такое градиентные световоды и почему они так называются?
8. Для каких целей применяются оптические волокна со смещенной ненулевой дисперсией?
9. Для чего выпускаются одномодовые волоконные световоды с вдавленной оболочкой?
10. Что такое диаметр поля моды?
11. Приведите определение апертурного угла.
12. Что характеризует числовая апертура?
13. Как зависит число мод в световоде от числовой апертуры?
14. Как зависит дисперсия импульсов от числовой апертуры?
15. Как зависит затухание в световоде от числовой апертуры?
16. Что отличает числовую апертуру градиентного световода от ступенчатого?

## Литература

1. Листвин А. В., Листвин В.Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. — М.: ЛЕСАРарт, 2003. — 288 с.
2. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. — М.: Техносфера, 2008. — 520 с.
3. Фриман Роджер Л. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; пер. с англ. под ред. Н. Н. Слепова. - 4-е доп. изд.. - М.: Техносфера, 2007. - 511 с.
4. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Техносфера: ООО "Волоконно-опт. техника", 2010. - 607 с.

## Лабораторная работа\_2

Измерение коэффициента затухание в оптическом волокне.

**Цель работы:** Изучение физических явлений приводящих к затуханию света в оптических волокнах, получение навыков по измерению коэффициента затухания, выявление особенностей ввода излучения в волокно связанных с вытекающими модами.

### Описание

Ослабление оптического излучения в оптическом кабеле дается выражением

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

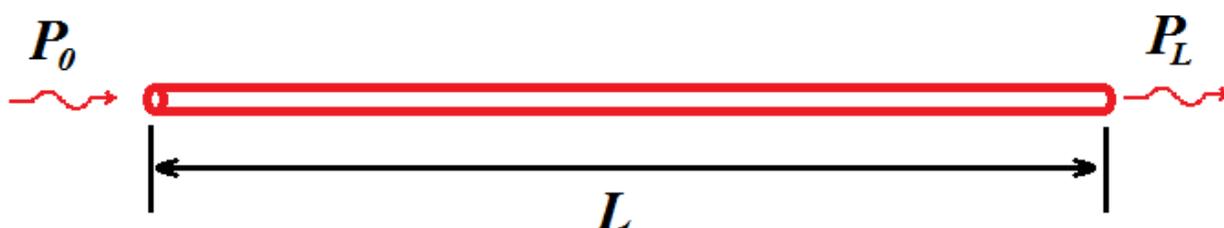


РИС.1. Оптическое волокно длиной  $L$  с оптической мощностью на входе  $P_0$  и на выходе  $P_L$ .

Таким образом, рассеиваемая в волокне оптическая мощность равна

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

отсюда можно определить коэффициент затухания излучения в волокне, если принять  $\alpha L \ll 1$ , то

$$P_s \approx P_0 \alpha L$$

и, следовательно,

$$\alpha \approx \frac{P_s}{P_0 L} \text{ в (1/km) или } \alpha_s \approx \left(\frac{1}{L}\right) 10 \cdot \lg\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \text{ в (dB/km)}$$

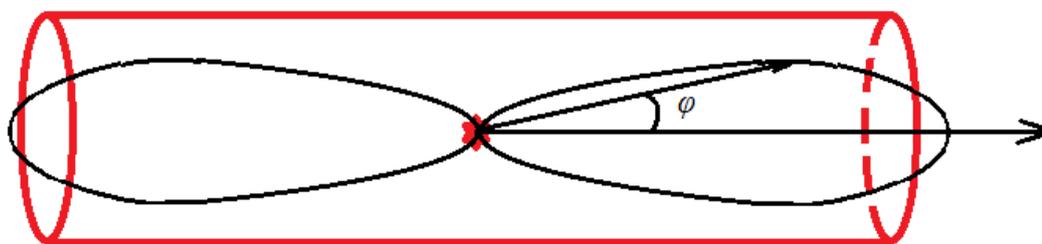


РИС.2. Диаграмма направленности рэлеевского рассеяния на оптических неоднородностях много меньших длины волны зондирующего излучения.

Обратно рассеивается не все излучение, часть следует в прямом направлении, часть покидает волокно, и только часть распространяется обратно, что

связано с диаграммой направленности рэлеевского рассеяния на отдельных дефектах, которая определяется выражением

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

где  $\varphi$  - угол составляемый направлением рассеяния с направлением вдоль волокна.

Обратно рассеиваемая часть  $k$  рэлеевского рассеяния зависит от захватываемого сердцевиной волокна излучения, которое пропорционально числовой апертуре деленной на показатель преломления и от некоторой постоянной так, что

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

здесь  $NA = n \cdot \sin(\varphi_c)$  - числовая апертура волокна, определяемая критическим углом  $\varphi_c$  и показателем преломления сердцевины  $n$ , таким образом  $(NA/n)^2$  определяет захватывающий рассеянное излучение пространственный угол,  $q$  - числовой коэффициент равный 4 для градиентного многомодового волокна и равный 4,55 для одномодового волокна.

Таким образом, рассеиваемое обратно излучение будет иметь мощность

$$P_{bs} = kP_0 [1 - \exp(-\alpha 2L)] \approx 2kP_0 \alpha L,$$

отсюда получаем выражение для коэффициента затухания

$$\alpha = \frac{1}{k} \cdot \frac{P_{bs}}{2P_0 L} \text{ в (1/km) или } \alpha_s = 4,343 \cdot \alpha \text{ в (dB/km)}.$$

Множитель  $1/2$  появляется в следствие двойного прохода обратно рассеянного излучения.

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка собирается на основе волоконно-оптических тестера, излучателя и измерителя типа "Рубин" и оптического кабеля различного вида и длины.

## Лабораторная работа\_2А

Измерение коэффициента затухание в оптическом волокне.

А. прямым методом определения потерь

### Порядок выполнения работы

#### Упражнение 1. Калибровка измерительной системы.

Собрать экспериментальную установку для калибровки оптической части измерительной системы. Провести измерение выходной мощности тестера, замкнув оптический выход источника излучения со входом измерителя мощности коротким оптическим кабелем (duplex), в соответствии с рисунком.

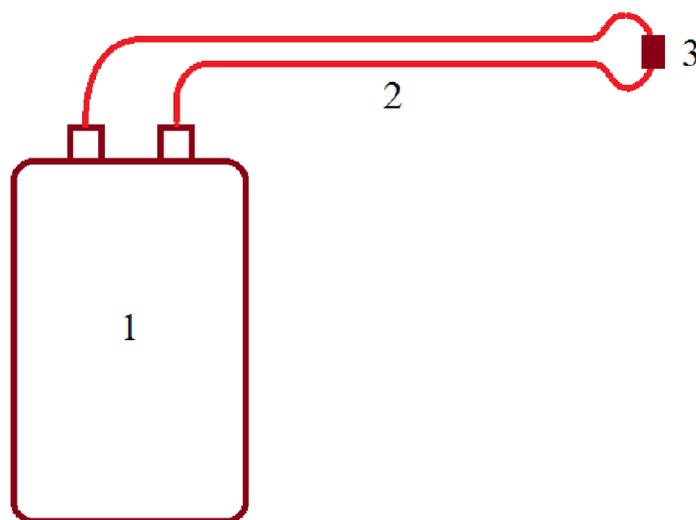


РИС.1. Блок-схема оптической установки по калибровки измерительной системы. 1 - волоконно-оптический тестер, 2 - волоконно-оптический кабель (duplex) длиной  $L_1 = 0,002$  km, 3 - переходник/адаптер SC-SC.

Выходная мощность источника для излучения на длине волны  $\lambda$ :

$P_1$  в dBm

Все проведенные результаты внести в таблицу 1.

Таблица 1. Экспериментальные результаты измерения оптической мощности излучения прошедшего эталонный оптический кабель.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Оптическая мощность источника $P_1$ , dBm	Длина эталонного кабеля $L_1$ , км
1550±20		0,002
1310±20		
850±20		

**Упражнение 2.** Измерение коэффициента затухания оптического волокна.

Собрать экспериментальную установку по измерению прямых потерь в исследуемом оптическом кабеле в соответствии с оптической схемой представленной на рисунке.

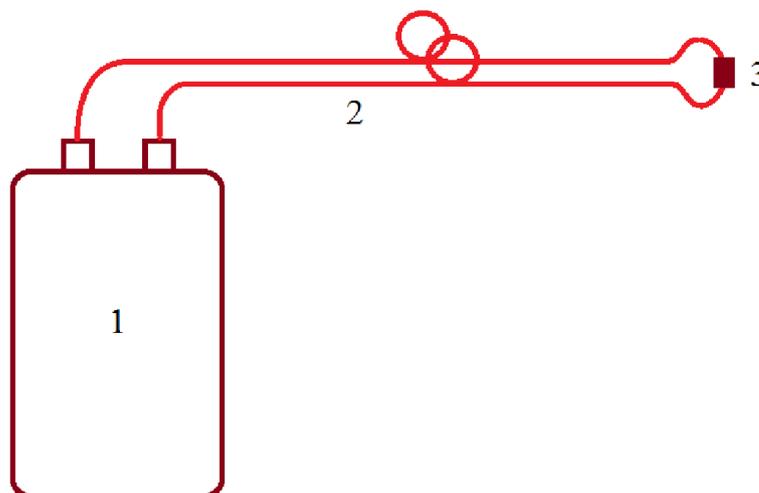


РИС.2. Блок-схема оптической установки по измерению коэффициента затухания в оптическом кабеле. 1 - волоконно-оптический тестер, 2 - волоконно-оптический кабель (duplex) длиной  $L_2=0,025$  km, 3 - переходник/адаптер SC-SC.

Выходная мощность источника для излучения на длине волны  $\lambda$ :

$$P_2 \text{ в dBm}$$

Все проведенные результаты внести в таблицу 2.

Таблица 2. Экспериментальные результаты измерения оптической мощности излучения прошедшего исследуемый оптический кабель.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Оптическая мощность источника $P_2$ , dBm	Длина эталонного кабеля $L_2$ , км
1550±20		0,025
1310±20		
850±20		

**Упражнение 3.** Обработка результатов измерений.

Вычислить коэффициент затухания для каждой длины волны в исследуемом образце оптического кабеля

$$\alpha = \frac{P_2 - P_1}{2(L_2 - L_1)} \text{ в (dB/km)}$$

Рассчитанные значения внести в таблицу и представить в отчете по работе.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Коэффициент затухания волокна $\alpha$ , dB/km
1550±20	
1310±20	
850±20	

## Лабораторная работа\_2В

Измерение коэффициента затухание в оптическом волокне.  
В. методом непрерывной рефлектометрии

### Порядок выполнения работы

#### Упражнение 1. Калибровка измерительной системы.

Провести измерение выходной мощности тестера, замкнув оптический выход источника излучения со входом измерителя мощности коротким оптическим кабелем, в соответствии с рисунком.

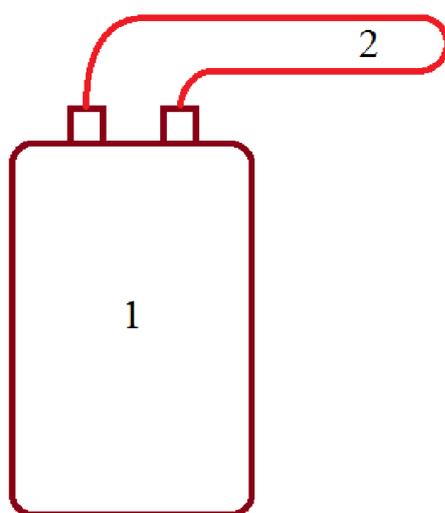


РИС.1. Блок-схема оптической установки по калибровки оптического тестера. 1 - волоконно-оптический тестер, 2 - оптический шнур.

Выходная мощность источника для излучения на длине волны  $\lambda$ :

$$P_0 \text{ в mW}$$

Все проведенные результаты внести в таблицу 1.

Таблица 1. Экспериментальные результаты измерения оптической мощности источника.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Оптическая мощность источника $P_0$ , mW
1550±20	
1310±20	
850±20	

Собрать экспериментальную установку для калибровки оптической части измерительной системы в соответствии с оптической схемой, представленной на рисунке.

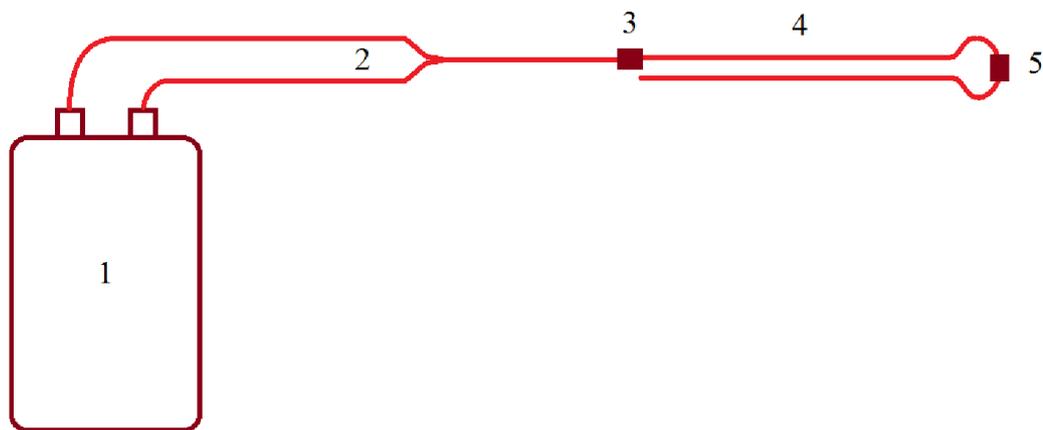


РИС.2. Блок-схема оптической установки по калибровке системы измерения. 1 - волоконно-оптический тестер, 2 - волоконно-оптический разветвитель 1x2 с делением 50/50, 3 и 5 - переходник/адаптер FC-FC и SC-SC, 4 - волоконно-оптический кабель (duplex) длиной  $L_1 = 0,002$  km.

Провести измерение мощности обратно рассеянного излучения для указанных длин волн источника.

$P_1$  в mW

*Упражнение 2. Измерение коэффициента затухания оптического волокна.*

Собрать экспериментальную установку по измерению обратного рассеяния в исследуемом оптическом кабеле в соответствии с оптической схемой представленной на рисунке.

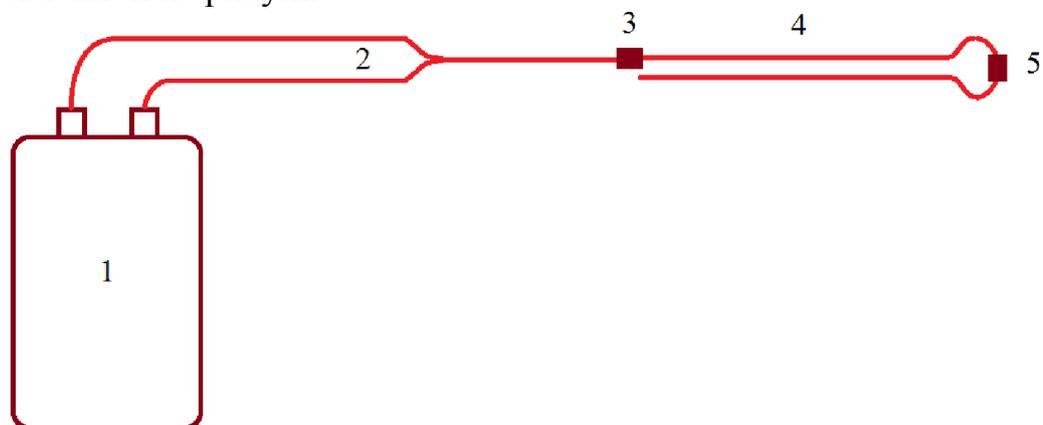


РИС.3. Блок-схема оптической установки по измерению коэффициента затухания. 1 - волоконно-оптический тестер, 2 - волоконно-оптический разветвитель 1x2 с делением 50/50, 3 и 5 - переходник/адаптер FC-FC и SC-SC, 4 - исследуемый волоконно-оптический кабель (duplex) длиной  $L_2 = 0,025$  km.

Провести измерение мощности обратно рассеянного излучения для указанных длин волн источника.

$P_2$  в mW

### Упражнение 3. Обработка результатов измерений.

Данные измерений полученные в упражнениях 1 и 2 внести в таблицу 2.

Таблица 2. Сведенные вместе измерения оптических мощности.

для $\lambda$ в nm $P_0$ в mW		$P_1$ в mW	$P_2$ в mW
1550±20			
1310±20			
850±20			

Вычислить коэффициент обратного рэлеевского рассеяния в оптическом волокне, который определяет долю излучения возвращаемого обратно:

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

здесь NA - числовая апертура волокна, n - показатель преломления сердцевины, q - числовой коэффициент равный 4 для градиентного многомодового волокна и равный 4,55 для одномодового волокна.

Вычислить коэффициент затухания в исследуемом образце оптического кабеля

$$\alpha = \frac{1}{k} \cdot \frac{P_2 - P_1}{2P_0(L_2 - L_1)} \text{ в (1/km) или } \alpha_s = 4,343 \cdot \alpha \text{ в (dB/km)}$$

Рассчитанные значения внести в таблицу и представить в отчет по работе.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Коэффициент затухания волокна, dB/km
1550±20	
1310±20	
850±20	

*Замечание.*

Для вычисления коэффициент обратного рэлеевского рассеяния в оптическом волокне принять значение числовой апертуры NA=0,2 и показателя преломления сердцевины n=1,45.

## Контрольные вопросы

1. Затухание света в оптическом волокне: понятие, коэффициент затухания, единицы измерения (1/m; dB/km).
2. Спектральные характеристики коэффициента затухания в плавленном кварце: окна прозрачности, минимумы потерь, влияние примесей.
3. Измерение оптической мощности, единицы измерения (W; dBm).
4. Физические принципы потерь в оптических волокнах: рассеяние, поглощение, отражение.
5. Вытекающие моды, нормализующие катушки.
6. Конструкция, назначение элементов, параметры оптического волокна.
7. Конструкция, назначение элементов, параметры оптического кабеля.

## Литература

1. Стерлинг Д.Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. –М.: ЛОРИ, 1998. – 288 с.
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.

## Лабораторная работа\_3

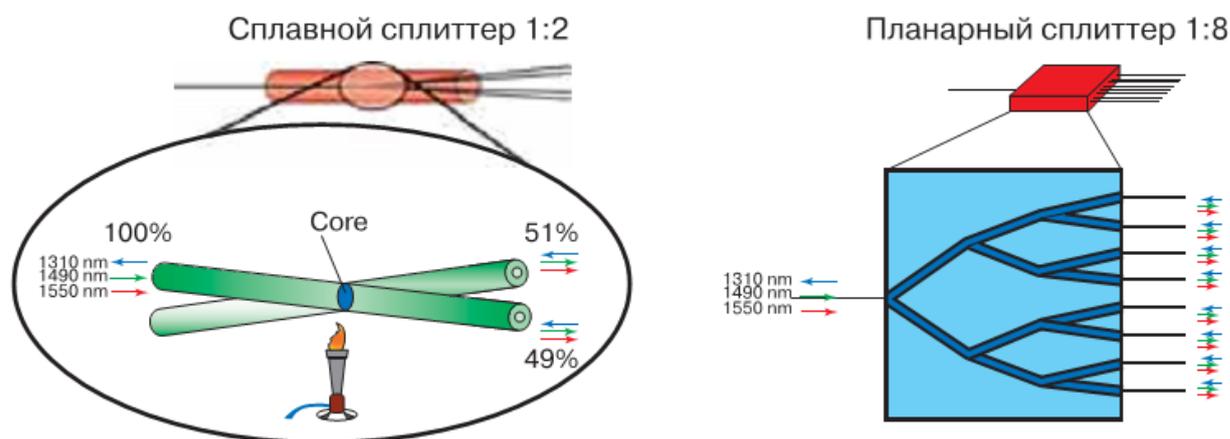
### Измерение параметров пассивного оптического элемента.

**Цель работы:** Изучение физических принципов деления оптических потоков в оптических волокнах и измерение параметров оптического сплиттера, полученного методом сплавления.

#### Описание

Оптический сплиттер (optical splitter, coupler, tap) разветвитель/ответвитель/делитель или оптический объединитель/сумматор (optical combiner) - волоконно-оптические устройства предназначенные для деления и/или объединения оптического излучения по мощности.

По типу производства оптические сплиттеры можно разделить на сварные FBT (fused biconic taper) splitter и планарные PLC (planar lightwave circuit) splitter.



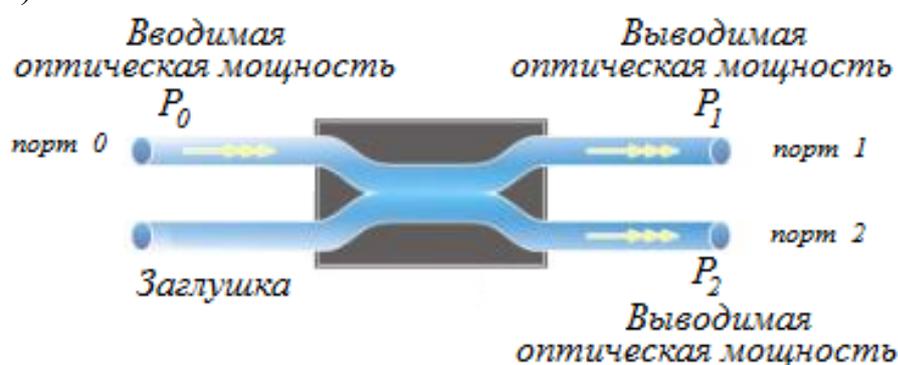
#### Основные технологии изготовления сплиттеров

##### *Типы оптических сплиттеров.*

Оптические сплиттеры разделяются по количеству выходов, по длине волны. Деление по количеству входов: оптические сплиттеры по количеству входу и выходов разделяются на X-образные (несколько входов и несколько выходов) и Y-образные (один вход и несколько выходов). Самый простейший X-образный оптический делитель имеет два входа и два выхода (так называемый оптический разветвитель 2×2). Самый простейший среди Y-образных оптических делителей — это оптический сплиттер, который имеет один вход и два выхода (так называемый оптический разветвитель 1×2). Y-образные сплиттеры называют делителями мощности. Y-образные делятся на два типа: симметричные и несимметричные. Симметричные Y-образные оптические делители, разделяют оптическую мощность между выходами равномерно. Несимметричные оптические делители позволяют разделить оптическую мощность в определенной пропорции.

Деление оптических сплиттеров по длине волны: оптические сплиттеры по своим спектральным характеристикам делятся на одноконные и двухконные. В сетях кабельного телевидения применяются одноконные оптические сплиттеры на стандартной для оптических передатчиков (лазеров) длине волны: 1310 нм или 1550 нм. В сетях PON используются в основном двухконные оптические разветвители, позволяющие одновременно передавать и принимать оптический сигнал по одному волокну. На одной длине волны, например, 1550 нм осуществляется передача информации от провайдера связи до абонента, а на длине волны 1310 нм осуществляется передача запроса от абонента к провайдеру.

Простейший оптический сплиттер имеет один вход и два симметричных выхода (1x2).



Разделение оптической мощности  $P_0$  на два потока  $P_1$  и  $P_2$  при помощи оптического сплиттера 1x2, имеющего один вход (порт 0) и два симметричных выхода (порты 1 и 2).

Основные параметры характеризующие оптический сплиттер:

*коэффициент деления*: симметричное/несимметричное (равномерное/неравномерное) деление мощности (equal/non-equal ratio) от 50/50 до 1/99 в процентах от входной мощности

*тип волокна*: одномодовые (singlemode, SM) и многомодовые (multimode, MM) оптические разветвители

*рабочая длина волны* (passbance, nm) - область длин волн оптического излучения для которых устройство предназначено

*коэффициент передачи* (transfer ratio, dB) - доля оптической мощности передаваемая из данного входа на данный выход;

*вносимые потери* (insertion loss, dB) - полные потери при переходе оптического излучения из одного входа в заданный выход;

*однородность/равномерность потерь* (loss uniformity, dB) - допустимая неравномерность деления оптической мощности между выходными портами

*возвратные/обратные потери* (return loss, dB)

*направленность* (directivity, dB) - логарифм отношения мощностей на выходе рабочего и нерабочего плеч вторичной линии

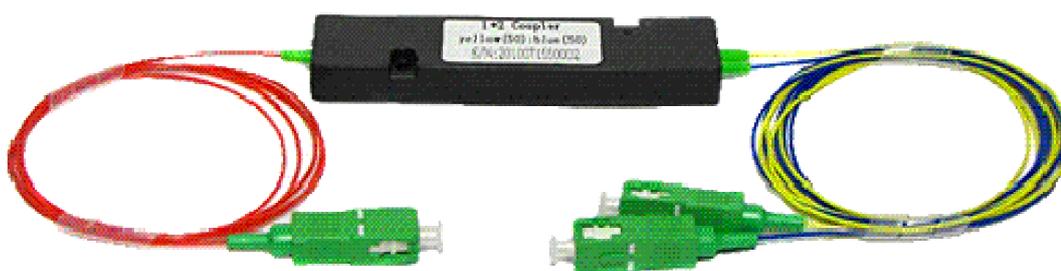
*поляризационные потери* (polarization dependent loss PDL, dB) - допустимые изменения потерь оптической мощности при передаче между входным и каждым из выходных портов, обусловленные изменением поляризации,  
*зависимость потерь от длины волны* (wavelength dependent loss, dB)  
*зависимость потерь от температуры* (temperature dependent loss, dB)  
*условия эксплуатации* (operating conditions): рабочий диапазон температур,

## Экспериментальная установка

Измерение параметров оптического сплиттера производится с помощью экспериментальной установки собранной на основе волоконно-оптического тестера, излучателя и измерителя типа "Рубин".

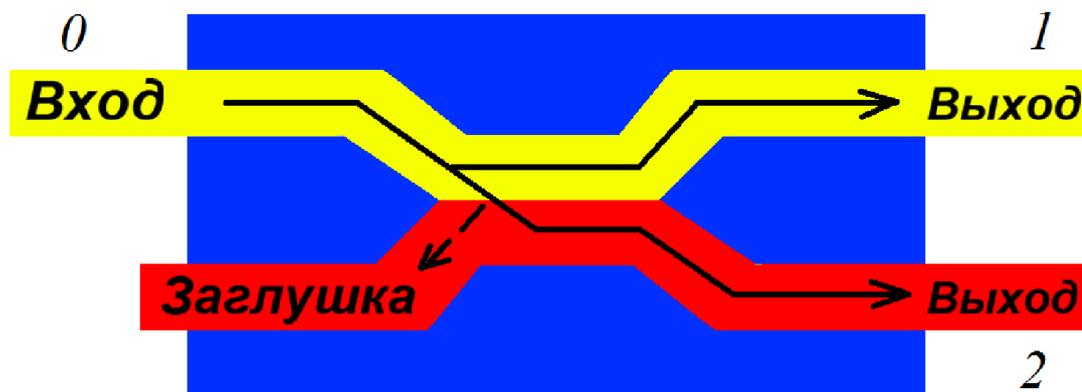


Семейство оптических устройств типа Рубин:  
волоконно-оптический тестер-телефон Рубин 021, волоконно-оптический источник оптического излучения Рубин 103, волоконно-оптический измеритель оптической мощности Рубин 201



Внешний вид оптического сплиттера 1x2

Для исследований использовался сплиттер 1X2, выполненный по сварной технологии и у которого один выход заглушен.



Измерения проводятся по следующей схеме: к одному из входов/выходов подключается источник излучения, а к остальным двум поочередно подключаются оптический измеритель. Затем источник подключается к другому входу/выходу и измерения повторяются. Измерения проводятся для входов/выходов. Перед проведением источник и измеритель калибруются, путем замыкания оптического выхода излучателя на оптический вход измерителя без промежуточных элементов, только с помощью оптического шнура.

#### Замечание

В качестве единиц измерения оптической мощности используются W (Ватт=Дж/м<sup>2</sup>) и dBm (децибел от милливатта), которые связаны между собой соотношением

$$P(dBm) = 10 \cdot \lg \left[ \frac{P(W)}{0,001(W)} \right] \text{ и } P(W) = 10^{-3} \cdot 10^{\left[ \frac{P(dBm)}{10} \right]}$$

Таблица пересчета dBm в mW (=0,001 W)

P, дБм	P, мВт	P, дБм	P, мВт	P, дБм	P, мВт
-20	0,010	-2	0,631	16	39,8
-19	0,013	-1	0,794	17	50,1
-18	0,016	0	1,00	18	63,1
-17	0,020	1	1,26	19	79,4
-16	0,025	2	1,58	20	100
-15	0,032	3	2,00	21	126
-14	0,040	4	2,51	22	158
-13	0,050	5	3,16	23	200
-12	0,063	6	3,98	24	251
-11	0,079	7	5,01	25	316
-10	0,100	8	6,31	26	398
-9	0,126	9	7,94	27	501
-8	0,158	10	10,0	28	631
-6	0,251	12	15,8	30	1 000
-5	0,316	13	20,0	31	1 259
-4	0,398	14	25,1	32	1 585
-3	0,501	15	31,6	33	1 995

## Порядок выполнения работы

**Упражнение 1. Калибровка источника оптического излучения и измерителя оптической мощности.**

Провести калибровку источника оптического излучения и измерителя оптической мощности (тестера) соединив оптическим кабелем выход источника со входом измерителя и определив  $P_0=P_1=P_2$  в dBm для каждой длины волны источника, данные занести в таблицу

Таблица 1. Экспериментальные результаты измерения оптической мощности источника.

Длина волны оптического излучения источника $\lambda$ , nm	Оптическая мощность источника $P_0=P_1=P_2$ , dBm
1550±20	
1310±20	
850±20	

**Упражнение 2. Измерение выходных мощностей сплиттера.**

Провести измерение выходной мощности сплиттера 1x2, подключая поочередно каждый из портов к источнику оптического излучения, а к остальным двум измеритель оптической мощности.

Измеренные значения оптической мощности внести в таблицу

Таблица 2. Измерение параметров оптического сплиттера 1x2

порт входа /мощность, dBm		порт 1 выхода /мощность, dBm		порт 2 выхода /мощность, dBm	
0 порт	$P_0 =$	1 порт	$P_{01} =$	2 порт	$P_{02} =$
1 порт	$P_1 =$	2 порт	$P_{12} =$	0 порт	$P_{10} =$
2 порт	$P_2 =$	0 порт	$P_{20} =$	1 порт	$P_{21} =$

**Упражнение 3. Расчет параметров сплитера**

Перед проведением расчетов перевести полученные измерения мощности из единиц измерения dBm в W по формуле

а. коэффициент деления, соотношение разветвления  
расчет коэффициента деления производится по результатам измерения при прямом включении сплитера (первая строка таблицы), когда на вход подается

мощность  $P_0$  (0 порт) и регистрируется оптическая мощность на выходе  $P_{01}$  (1 порт) и  $P_{02}$  (2 порт):

$$a = \frac{P_{01}}{P_{01} + P_{02}} \cdot 100\% \text{ и } b = \frac{P_{02}}{P_{01} + P_{02}} \cdot 100\%$$

оптические мощности  $P_0, P_{01}, P_{02}$  в W  
результат представляется в виде

$a/b$

б. вычислить вносимые (полные) потери;  
оптические мощности выраженные в W использовать для вычисления вносимых потерь, которые вычисляются для каждого включения сплитера по формуле

$$\beta_i = 10 \cdot \lg \left( 1 - \frac{P_{i1} + P_{i2}}{P_i} \right) \text{ в дБ}$$

полные избыточные потери определяются как:

$$a_{exc}(i) = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_{i1} + P_{i2}}{P_i} \right) \text{ в дБ,}$$

результаты представить в виде

$$\beta_0, \beta_1, \beta_2 \text{ и } a_{exc}(0), a_{exc}(1), a_{exc}(2)$$

с. вычислить коэффициент передачи или вычислить коэффициент направленности;  
используя выражение оптической мощности в dBm определить коэффициент направленности (или коэффициент передачи  $b_{ins}(i, j) = -a_{ins}(i, j)$ ) по формуле

$$b_{ins}(i, j) = -a_{ins}(i, j) = P_{ij} - P_i \text{ в дБ.}$$

результаты представить в виде

для прямого включения

$$b_{ins}(0,1), b_{ins}(0,2)$$

для обратного включения

$$b_{ins}(1,0), b_{ins}(1,2) \text{ и } b_{ins}(2,0), b_{ins}(2,1)$$

д. вычислить возвратные/обратные потери

## Контрольные вопросы

1. Пассивные оптические элементы: типы, назначения, применение.
2. Оптический разветвитель: назначение, применение, технологии изготовления.
3. Основные параметры разветвителя: коэффициент передачи, коэффициент направленности, вносимые потери.
4. Потери на обратное рассеяние, возвратные потери.
5. Основные характеристики разветвителя Y-типа.
6. Физические принципы деления светового потока: деление по амплитуде, деление по фронту, оптическое туннелирование.

## Литература

1. Стерлинг Д.Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. –М.: ЛОРИ, 1998. – 288 с.
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.

## Приложение 1

### Потери, характеризующие разветвители.

Введём следующие обозначения:

$P_i$  – мощность оптического сигнала, приходящего на полюс  $i$ ;

$P_{ij}$  – мощность, регистрируемая на выходном полюсе  $j$ .

Следующие три набора параметров считаются основными при описании разветвителя.

**Коэффициенты передачи** или вносимые потери определяют потери мощности сигнала, который приходит на один из входных полюсов и выходит из одного из выходных полюсов. Коэффициенты передачи определяются соотношением:

$$a_{ins}(i, j) = -10 \cdot \lg\left(\frac{P_{ij}}{P_i}\right) \text{ в дБ.}$$

Индексы  $i, j$  пробегает значения номеров входных и выходных полюсов соответственно, например,  $i=a, j=1$ .

**Коэффициент направленности** является мерой того, как хорошо разветвитель передаёт мощность в предназначенные выходные полюса. Он показывает интенсивность нежелательного обратного канала, возникающего на другом полюсе из входной группы полюсов, и определяется как:

$$b_{ins}(i, j) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{ij}}{P_i}\right) \text{ в дБ.}$$

Индексы относятся к одной группе полюсов, например  $i=2, j=3$ , или  $i=a, j=c$ . Для точного измерения коэффициента направленности, необходимо подавить влияние обратного рассеяния от соединителей в последующем канале. Для этой цели волокна всех полюсов за исключением  $i$  и  $j$  помещают в светопоглощающую иммерсионную жидкость с коэффициентом преломления, близким к оптическому волокну. Мощность, отраженная обратно, проходит через ответвитель. Ответвитель выбирается таким образом, чтобы подавляющая часть обратного сигнала направлялась в приемник. Перед этими измерениями ответвитель градуируется.

**Потери на обратном рассеянии:**

$$b_{ret}(i) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{ii}}{P_i}\right) \text{ в дБ,}$$

здесь  $P_{ii}$  - регистрируемая выходная мощность на полюсе  $i$  при условии подачи сигнала на этот же полюс. Этот коэффициент схож с коэффициентом обратных потерь в оптических соединителях.

Коэффициенты передачи принимают положительные значения и характеризуют эффективность передачи в прямом направлении. Коэффициенты направленности и потерь на обратном рассеянии принимают отрицательные значения и характеризуют нежелательные обратные сигналы. При изготовлении разветвителей стремятся достичь как можно меньших (более отрицательных) значений для коэффициентов направленности и потерь на обратном рассеянии.

**Полные избыточные потери** определяются как:

$$a_{exc}(i) = 10 \cdot \lg \left( \frac{\sum P_{ij}}{P_i} \right) \text{ в дБ,}$$

где знаменатель дроби под логарифмом соответствует входному сигналу на входном полюсе  $i$ , а числитель – суммарному полезному выходному сигналу. Этот параметр является общей характеристикой работы разветвителя.

**Рабочий диапазон длин волн** (passbance) – диапазон длин волн, в пределах которого определена работа разветвителя. Чем шире диапазон, тем меньше зависимость вносимых потерь разветвителя от длины волны. Разветвители, имеющие большой рабочий диапазон длин волн, называются **ахроматическими**. Лазеры без охлаждения и светоизлучающие диоды требуют полосы пропускания  $\pm 35$  нм в окрестности несущей длины волны. Для поддержания такого диапазона оптический разветвитель должен быть ахроматическим.

**Потери на разветвлении** – это потери, связанные с тем, что мощность естественным образом распределяется между выходными полюсами. Для идеального разветвителя (**1xm**) с **m** выходными полюсами, в предположении равенства выходных мощностей между ними, потери на разветвлении определяются соотношением:

$$a_{SL} = -10 \cdot \lg \left( \frac{1}{m} \right) \text{ в дБ.}$$

Это минимальное значение, присущее идеальному разветвителю с симметричными выходными полюсами. Так для разветвителя 4x4 потери  $a_{SL}=6,02$  дБ.

**Соотношение разветвления** описывает, каким образом свет распределяется между полюсами. Эта характеристика, свойственная оптическим ответвителям, может быть выражена как в виде набора коэффициентов передачи по выходным полюсам, так и в виде процентной пропорции мощностей по выходным полюсам, где за 100% принята суммарная выходная мощность.

## Лабораторная работа\_4

Паразитные акустические модуляции и наводки в элементах волоконно-оптических сетей:

А. спектральный анализ.

В. анализ артикуляционным методом.

**Цель работы:** Изучение физических принципов акустических паразитных модуляций и наводок в оптических потоках кабеля, измерение основных параметров, демонстрация канала утечки речевой информации на их основе.

### Описание

Современные волоконно-оптические технологии находят широкое применение в кабельных телекоммуникационных и локальных системах связи, которые вытесняют электрический кабель как среду передачи информации. В связи с чем возникает проблема построения модели угроз от использования новых технологий передачи информации. Одна из угроз связана с обеспечением конфиденциальности переговоров на объекте информатизации при использовании вблизи от них оптических кабельных сетей различного назначения. Данная угроза определяется паразитными модуляциями и наводками в оптических потоках через оптическое волокно от акустического поля создаваемого речью.

Воздействие акустических волн через воздушную среду или конструкции зданий на оптический кабель приводит к механическим возмущениям составляющих его элементов, которое вызывает изменение условий прохождения оптического излучения через оптическое волокно. Т.о. происходит модуляция по параметрам (интенсивности, поляризации, фазе частоте) оптического потока проходящего по волокну, что формирует информативный оптически сигнал. Существующие оптические сети охватывают большие пространства объекта информатизации и выходят за пределы контролируемой зоны, что позволяет нарушителю произвести демодуляцию информативного сигнала и получить доступ к конфиденциальным переговорам. Одна из возможных схем представлена на рис.1.

Архитектура оптической сети включает широкое разнообразие пассивных и активных элементов, на которых акустические паразитные модуляции и наводки могут эффективно использованы для формирования технического канала утечки речевой информации. Одними из таких элементов являются оптические разъемные соединения, которые используются для оперативного подключения элементов сети, её масштабирования и других целей.

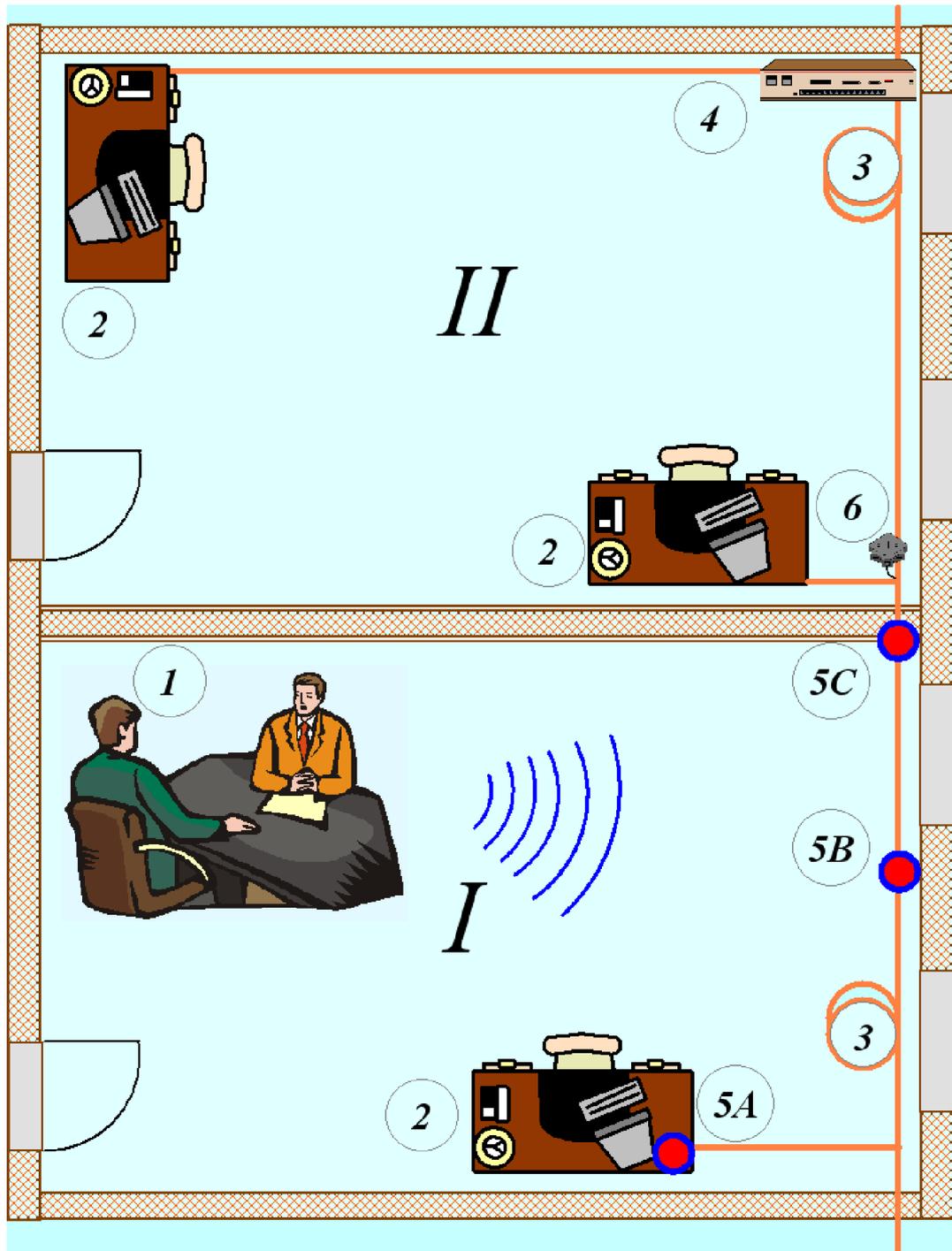


РИС. 1. Принципиальная модель-схема канала утечки конфиденциальной акустической (речевой) информации через волоконно-оптические коммуникации. *I* – комната переговоров, кабинет руководителя, служебная комната *II* – вспомогательное помещение, *1* – место переговоров, *2* – рабочее место с компьютером, *3* – волоконно-оптические коммуникации, *4* – активное волоконно-оптическое оборудование, *5* – участки волоконно-оптического кабеля наиболее подверженные акустическому воздействию (*A, B, C*), *6* – технические средства разведки (ТСР) по съему речевой информации.

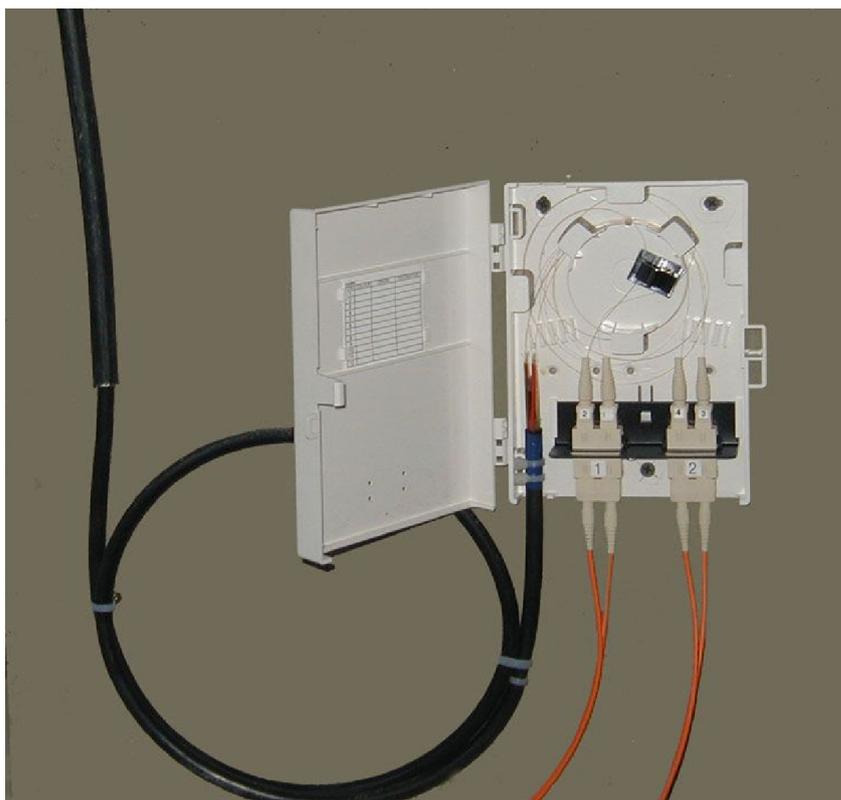


РИС.2. Оптический кросс волоконно-оптической подсистемы СКС (Структурированной Кабельной Системы).

Например, на этаже здания объекта при разветвлении магистральной сети для подключения конечных пользователей используется оптический кросс (рис.2), в котором кабель вертикальной прокладки разводится к пользователям кабелем горизонтальной прокладки. Также, через разъемное соединение происходит подключение пользователя к сети. Разъемное соединение является одним из возможных элементов формирования канала утечки речевой информации.

Паразитная модуляция света в разьеме акустическим полем происходит вследствие воздействия акустической волны на разъем, которое приводит к модуляции геометрических параметров соединения (рис.3) - угловое расхождение осевых направлений волокон  $\theta$ , неплотная стыковка волокон  $s$ , радиальное смещение волокон  $d$ . Изменение каждого из параметров соединения приводит к модуляции интенсивности проходящего или отраженного светового потока, которая и является информативным сигналом. Эффективность механических колебаний стыка волокон под действием акустической волны связана колебательными свойствами всего разъемного соединения: конструкции, геометрических размеров, упругих свойств применяемых материалов и т.д. Как всякая колебательная системы, разъем обладает резонансными свойствами, характеризуемый резонансной частотой и добротностью. При попадании частоты резонанса в область

речевого сигнала (около 1 кГц) приводит к повышению эффективности модуляции и в некоторых случаях к микрофонному эффекту. Поэтому выявление резонансных частот разъема, как механической колебательной системы, является важной исследовательской задачей определяющей эффективность канала утечки.

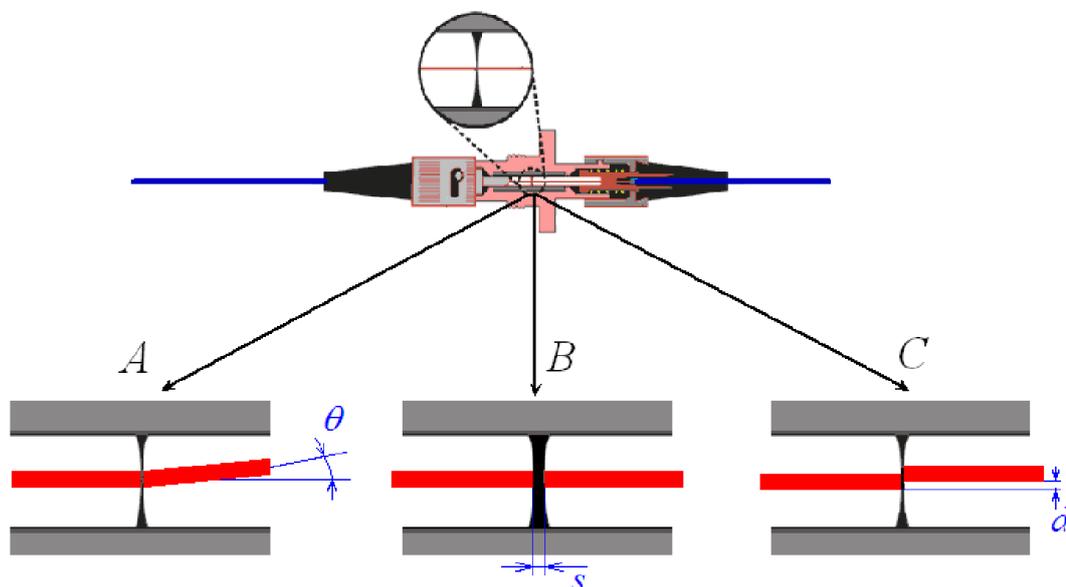


РИС.3. Схематическое изображение разъемного соединения с возможными неидеальностями в оптическом соединении. А – угловое рассогласование с углом  $\theta$ , В – неплотное соединение с расстоянием между волокнами  $s$ , С – радиальное смещение на расстояние  $d$ .

Одним из основных методов оценки эффективности речевого канала утечки являются артикуляционные измерения. Например, оценку эффективности канала утечки проводят по словесной разборчивости  $W$  информативного сигнала получаемого с помощью технических средств разведки. Данная методика совпадает с методами оценки эффективности телефонных каналов связи, в которых на вход линии связи диктор начитывает набор  $N_0$  слов, а на выходе оператор (слушатель) их распознает на слух, если число правильно понятых слов равно  $N_x$ , то разборчивость речи будет равна

$$W = \frac{N_x}{N_0} \cdot 100\%.$$

В зависимости от значения  $W$  оценивается качество канала связи. В случае технического канала утечки речевой информации, для её оценки используется следующая шкала определения опасности любым оператором

1. уровень опасности - речь на фоне шумов прослушивается и распознается;
2. уровень опасности - речь на фоне шумов прослушивается, но не распознается;
3. уровень опасности - речь на фоне шумов не прослушивается.

## Экспериментальная установка.

Блок схема экспериментальной установки представлена на рис.4.

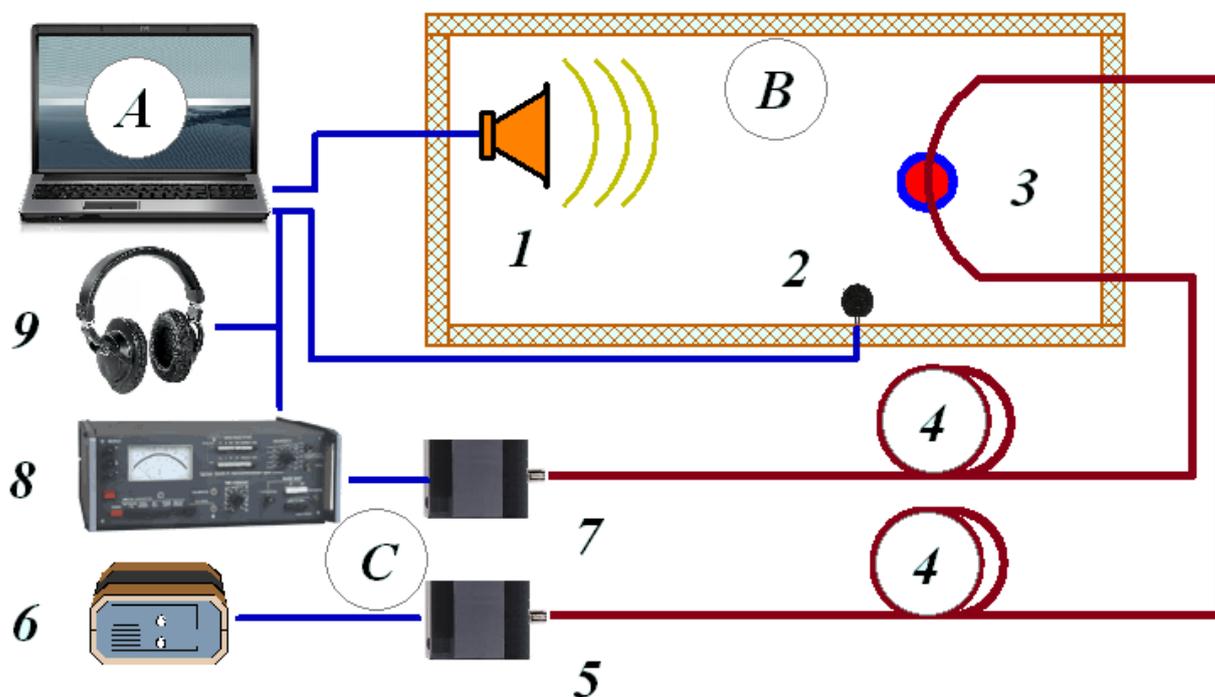


РИС.4. Демонстрационно-лабораторный стенд акустооптического ТКУИ через волоконно-оптические коммуникации. А – управляющий компьютер, В – акустометрическая камера, С – оптический блок.

1 – акустическая система, 2 – измерительный микрофон контроля уровня звука в камере, 3 – волоконно-оптический элемент, 4 – оптический кабель, 5 – лазер с волоконно-оптическим выходом, 6 – блок управления лазера, 7 – фотоприемное устройство с волоконно-оптическим входом, 8 – селективный усилитель (нанольтметр), 9 – головная гарнитура оператора.

Установка состоит из трех блоков. Все управление работой установкой осуществляется через компьютер (А) со звуковой картой, которая выполняет функции генератора информационного сигнала и измерителя основных параметров регистрируемого информативного сигнала. С выхода звуковой карты сигнал поступает в динамик, расположенный в акустометрической камере (В), в которой формируется контролируемое с помощью микрофона акустическое информационное поле. Акустометрическая камера звукоизолирована от окружающей среды с ослаблением до 20 дБ. Акустический информационный сигнал воздействует на исследуемый пассивный волоконно-оптический элемент, вызывая в котором паразитные акустические модуляции и наводки на проходящие оптические потоки. Моделирование волоконно-оптической сети осуществляется с помощью оптического блока (С), который включает источник и приемник оптического излучения, соединенные между собой волоконно-оптическим кабелем.

Паразитные акустические модуляции и наводки на оптические потоки, регистрируемые приемником в виде колебаний мощности оптического излучения (рис.5) усиливаются и направляются в систему управления (компьютер) или на наушники для прослушивания оператором.

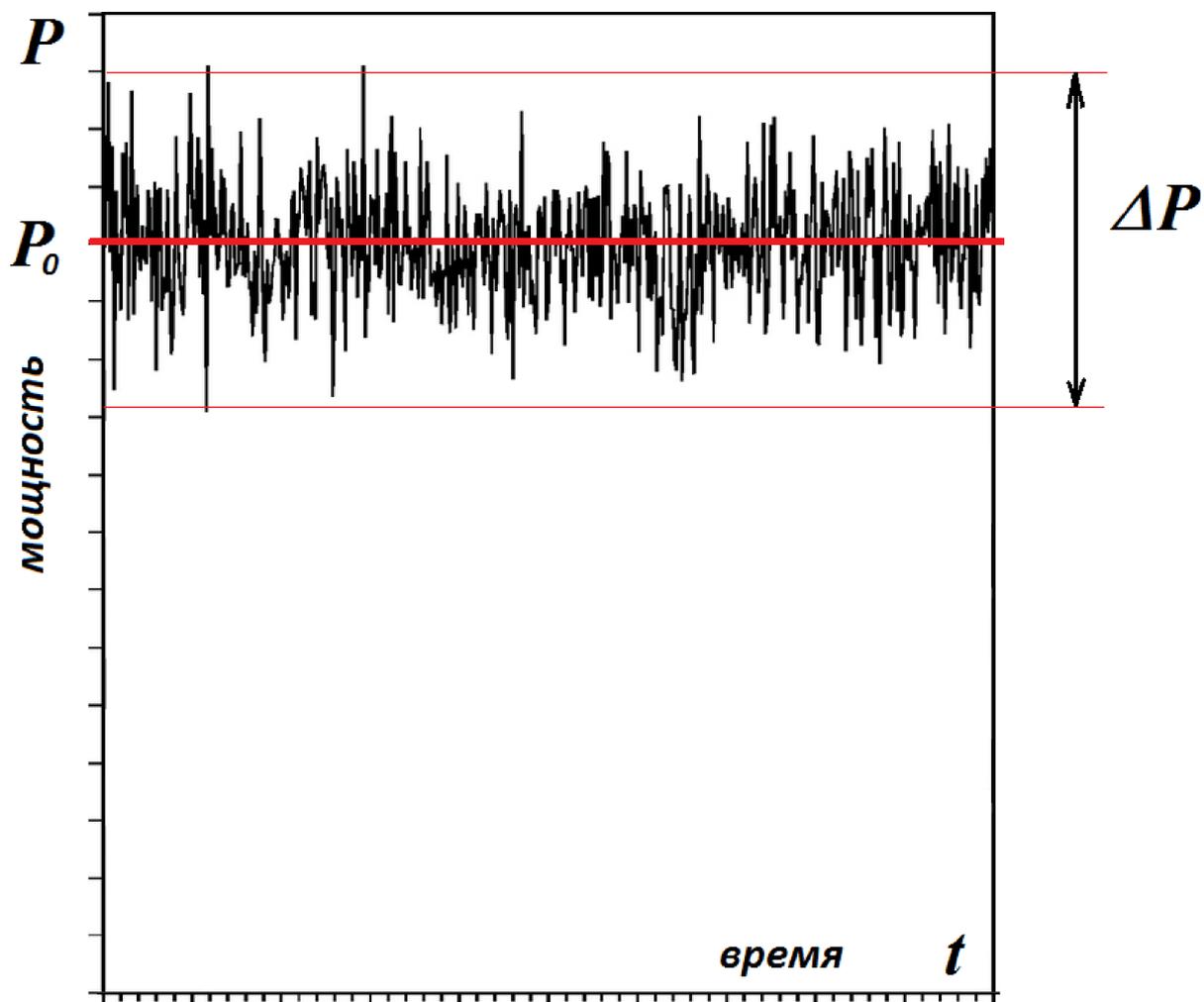


РИС.5. Паразитные модуляция мощности оптического излучения в волокне вызванные внешними случайными акустическими воздействиями с глубиной модуляции  $m=P_m/P_0$  оптической несущей со средней мощностью  $P_0$  и амплитудой модуляции  $P_m$ .

Блок управления (компьютер) включает измеритель мощности для определения среднего значения уровня звукового давления информативного сигнала и спектроанализатор для наблюдения его распределения по частотам. При точных измерениях спектральной плотности используется селективный нановольтметр.

## Лабораторная работа\_4А

Паразитные акустические модуляции и наводки в элементах волоконно-оптических сетей:

А. спектральный анализ.

### Порядок выполнения работы

*Упражнение 1. Изучение работы системы регистрации.*

Включить установку - компьютер, гелий неоновый лазер ЛГ-72, селективный нановольтметр UNIPAN 233.

Установить чувствительность нановольтметра в диапазоне 100 нВ в полосе частот от 50 Гц до 15 кГц при селективности 0 дБ/октава.

Подать на динамики сигнал со спектром белого шума с уровнем звукового давления 65 дБ.

Провести измерения шумового напряжения  $u_0$ .

*Упражнение 2. Снятие спектральной зависимости акустических модуляций светового потока.*

Сохранить все установки приборов как в упражнении 1.

Изменить селективность UNIPAN 233 с 0 дБ/октава на 54 дБ/октава

Измерить шумовое напряжение на выделенных частотах, данные занести в таблицу

диапазон 50-150 Гц

f, Гц	50	70	90	110	130
u, мкВ					

диапазон 150-500 Гц

f, Гц	150	220	290	360	430
u, мкВ					

диапазон 500-1500 Гц

f, Гц	500	700	900	1100	1300
u, мкВ					

диапазон 1500-5000 Гц

f, Гц	1500	2200	2900	3600	4300
u, мкВ					

диапазон 5000-15000 Гц

f, Гц	5000	7000	9000	11000	13000
u, мкВ					

**Упражнение 3. Обработка результатов измерений.**

Рассчитать спектральную глубину модуляции при воздействии сигнала белого шума с уровнем звукового давления 65 дБ для каждой из частот

$$m(f) = \frac{u}{u_0}$$

Построить график зависимости спектральной глубины модуляции от частоты

$$m(f)$$

По графику определить резонансные частоты колебательной системы

$$\{f_1, f_2, \dots\}$$

Написать вывод по работе.

## Лабораторная работа\_4В

Паразитные акустические модуляции и наводки в элементах волоконно-оптических сетей:

В. анализ артикуляционным методом.

### **Порядок выполнения работы**

*Упражнение 1. Изучение работы системы регистрации.*

Включить установку - компьютер, гелий неоновый лазер ЛГ-72, селективный нановольтметр UNIPAN 233.

Установить чувствительность нановольтметра в диапазоне 100 нВ в полосе частот от 50 Гц до 15 кГц при селективности 0 дБ/октава.

Подать на динамики речевой сигнал с уровнем звукового давления 65 дБ.

Провести прослушивание информативного сигнала через наушники.

Изменяя параметры селективного нановольтметра получит наилучшую разборчивость речи.

*Упражнение 2. Артикуляционные измерения информативного сигнала.*

Качественно определить разборчивость речи, непрерывно прослушивая информативный сигнал несколько раз.

Оценить качество разборчивости в процентах

*Упражнение 3. Обработка результатов измерений.*

## Контрольные вопросы

1. Физические принципы паразитных модуляций и наводок в пассивных элементах оптической сети.
2. Оптический разъем как механическая колебательная система и её свойства (резонанс, добротность и др.).
3. Роль механических резонансов оптического разъема для паразитных акустических модуляций и наводок, возможность формирования канала утечки речевой информации по волоконно-оптическим системам.
4. Фотоприемные устройства, влияние их параметров на эффективность формирования речевых ТКУИ через волоконно-оптические кабельные сети.
5. Источники света (роль волоконно-оптических лазеров), влияние их параметров на эффективность формирования речевых ТКУИ через волоконно-оптические кабельные сети.
6. Селективный нановольтметр типа UNIPAN: характеристики и особенности.

## Литература