



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
И КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧиКР)**

**А.Е. Мандель**

**МЕТРОЛОГИЯ В ОПТИЧЕСКИХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Учебно-методическое пособие по организации  
самостоятельной работы студентов специальности  
210401 «Физика и техника оптической связи»**

2010

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

Утверждаю  
Зав. кафедрой СВЧ и КР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович  
" 01 " \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 2010г.

**МЕТРОЛОГИЯ В ОПТИЧЕСКИХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Учебно-методическое пособие по организации  
самостоятельной работы студентов специальности  
210401 «Физика и техника оптической связи»

Разработчик:  
профессор. каф. СВЧ и КР  
\_\_\_\_\_ А.Е. Мандель

**УДК  
681.7.068(075.8)**

Рецензент:  
профессор каф.СВЧиКР

Шарангович С.Н.

**А.Е. Мандель**

Метрология в оптических телекоммуникационных системах: учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов /

А.Е. Мандель. – Томск: ТУСУР, 2010. –27с

Приводится программа курса, его цели и задачи. Представлены темы лабораторных занятий, а также темы практических занятий. Представлены темы и вопросы контрольных работ и перечень индивидуальных заданий. Приводится список экзаменационных вопросов и приведены примеры ответов на экзаменационные вопросы.

Методические указания предназначены для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения специальности 210401 по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах» и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки бакалавриата «Телекоммуникации».

**УДК  
681.7.068(075.8)**

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2010

© Мандель А.Е. 2010

**Оглавление**

Введение. ....	5
1. Цели и задачи дисциплины. ....	7
2. Содержание разделов дисциплины. ....	8
3. Лабораторные занятия. ....	11
4. Практические занятия. ....	11
5. Контрольные работы ....	13
5.1. Контрольная работа №1. ....	13
5.2. Контрольная работа №2. ....	14
6. Экзаменационные вопросы ....	15
6.1. Список экзаменационных вопросов ....	15
6.2. Примеры ответов на экзаменационные вопросы. ....	16
7. Контрольные этапы и их максимальный рейтинг. ....	23
8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины. ....	25

## Введение

Самостоятельная работа студентов является частью учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие профессиональные навыки будущего специалиста, такие как: внутренняя готовность к самообразованию в профессиональной сфере, самостоятельность, инициативность и ответственность, умение работать с источниками информации.

Предметно и содержательно самостоятельная работа студентов определяется образовательным стандартом "Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по направлению 654400 «Телекоммуникации», включающего специальность 210401 - «Физика и техника оптической связи», утвержденным 10.03 2000, (Рег. № 20 тех/дс.) и рабочей программой по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах», утвержденной в ТУСУРе.

Каждая дисциплина должна иметь методическое сопровождение по самостоятельному изучению разделов и тем, указанных в рабочей программе, по написанию рефератов, выполнению расчетно-графических и лабораторных работ. В связи с этим эффективная организация самостоятельной работы студентов требует проведения целого ряда мероприятий, создающих предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы, а именно:

- обеспечение студентов информационными ресурсами (учебными пособиями, справочниками, банками индивидуальных заданий);
- обеспечение студентов методическими материалами (учебно-методическими практикумами, сборниками задач, указаниями по выполнению лабораторных работ);
- наличие материальных ресурсов (ПК, измерительного и технологического оборудования для выполнения заданий в рамках НИР и ГПО);
- организация консультаций преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и практических результатов, полученных студентом самостоятельно при выполнении НИРС и ГПО (конференции, олимпиады, конкурсы).

Важным элементом в организации самостоятельной работы студентов является контроль. Контроль требует разработки преподавателем контролирующих материалов в текстовом или тестовом исполнении, а при использовании ПК - пакета прикладных программ для проверки знаний студентов. Эффективная система контроля (в т.ч. электронная система контроля), наряду с рейтинговой системой оценки знаний, позволит добиться

систематической самостоятельной работы студентов над учебными материалами и повысить качество обучения.

Пособие разработано в соответствии с временными рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобразования РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

## 1. Цели и задачи дисциплины

**Целью** преподавания дисциплины "Метрология в оптических телекоммуникационных системах" является изучение системы метрологического обеспечения в оптическом диапазоне.

**Основными задачами** изучения дисциплины являются:

- изучение студентами методов, схем и приемов измерений основных параметров оптических телекоммуникационных систем, их отдельных элементов и способов обеспечения требуемой точности измерений.
- изучение студентами принципов действия, устройство и технические характеристики основных рабочих средств измерений, используемых в системе метрологического обеспечения в оптическом диапазоне.

### 1.2 Требования к уровню освоения содержания дисциплины

По итогам освоения курса и выполнения самостоятельной работы студенты должны:

- **знать** методы измерений основных параметров оптических телекоммуникационных систем и их отдельных элементов;
- **знать** принципы действия основных средств измерений оптического диапазона;
- **знать** основные принципы поверки средств измерений;
- **уметь** выбирать необходимые средства измерений для решения конкретных измерительных задач;
- **иметь** практические навыки в проведении измерений в оптическом диапазоне.

### 1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения дисциплин: "Оптические цифровые телекоммуникационные системы", "Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи", "Основы физической и квантовой оптики", "Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства".

### 1.4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид обучения	Очное (8 семестр)	Заочное (10,11 семестр)
Вид учебной работы	Всего часов	
Общая трудоемкость дисциплины	150	150
Лекции	48	20
Лабораторные занятия	24	12
Практические занятия	16	8

Самостоятельная работа	62	110
Вид итогового контроля	Экзамен	Экзамен

### Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции (48час)	Лаб. занятия (24 час)	Практ. занятия (16 час)
1	Измерительные задачи в оптических телекоммуникационных системах. Статистическая оценка характеристик погрешности измерений	6		4
2	Параметры, измеряемые в оптических телекоммуникационных системах	3	4	2
3	Основные методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи	16	8	4
4	Основные методы и средства измерений параметров трактов цифровых телекоммуникационных систем	13	6	4
5	Контроль волоконно-оптических линий связи	8	8	2
6	Поверка средств измерений оптического диапазона	2		

## 2. Содержание разделов дисциплины

### 2.1. Разделы лекционного курса

#### 2.1.1. Введение

Особенности и роль метрологии в современных оптических телекоммуникационных системах.

#### 2.1.2. Измерительные задачи в оптических телекоммуникационных системах

Основные понятия и определения системы метрологического обеспечения в оптических телекоммуникациях. Статистическая оценка характеристик погрешности измерений. Понятия контроля, тестирования,



анализа протоколов. Измерительные задачи, решаемые в процессе производства, строительства и эксплуатации оптических телекоммуникационных систем. Виды измерений систем передачи: настроечные, приемо-сдаточные, эксплуатационные плановые и эксплуатационные внеплановые.

*Методические указания.* Материал можно изучать, используя [1,4, 5, 6,].

### **2.1.3. Параметры, измеряемые в оптических телекоммуникационных системах**

Основные измеряемые параметры оптических многомодовых и одномодовых волокон. Основные измеряемые параметры и характеристики оптических излучателей и фотоприемных устройств. Основные измеряемые параметры каналов и трактов оптических телекоммуникационных систем. Основные измерения в многоволновых системах передачи. Изменяемые параметры оптических усилителей.

*Методические указания.* Материал можно изучать, используя [1,2,4 ,5,6].

### **2.1.4. Основные методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи**

Методы измерения абсолютной оптической мощности. Измерение малоинтенсивного оптического излучения на основе фотодиодов. Факторы, влияющие на точность измерения абсолютной мощности светового излучения. Принципы построения измерителей абсолютной оптической мощности. Основные технические и метрологические характеристики оптических ваттметров.

Методы измерения затухания оптических волокон: метод обламывания; метод вносимых потерь. Источники погрешностей при измерении затухания. Способы достижения равновесного распределения мод в многомодовых оптических волокнах. Оптические тестеры. Основные технические и метрологические характеристики оптических тестеров.

Особенности ввода измерительного сигнала в оптическое волокно. Апертурный угол. Согласование числовых апертур. Методы измерения числовой апертуры оптических волокон: метод "трех колец", методы ближней и дальней зоны.

Особенности измерений параметров одномодовых оптических волокон. Длина волны отсечки одномодовых волокон. Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности. Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля.

Методы измерения диаметра модового пятна: метод ближнего поля, метод поперечного смещения.

Виды дисперсии оптических волокон: межмодовая, хроматическая, поляризационная модовая. Методы измерения межмодовой дисперсии во временной и частотной области. Методы измерения хроматической дисперсии: метод сдвига фаз, метод дифференциального сдвига фаз. Факторы, влияющие на точность измерения хроматической дисперсии

Измерение поляризационной модовой дисперсии методом сканирования длины волны.

**Методические указания.** Материал можно изучать, используя [1,2,4-8].

### **2.1.5. Основные методы и средства измерений параметров трактов цифровых телекоммуникационных систем**

Нормы на параметры ошибок цифровых систем передачи. Критерии оценки качества передачи в высокоскоростных сетях связи. Измерители коэффициентов ошибок. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона. Измерение коэффициентов ошибок с помощью псевдослучайной последовательности. Методы, основанные на анализе цифрового сигнала. Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок: измерение энергетического потенциала линии связи, измерение чувствительности приемного устройства, измерение запаса мощности, обусловленной дисперсией волокна.

Дрейф и дрожание фазы. Нормы на максимальное значение дрейфа и дрожания фазы для иерархических стыков цифровых систем передачи. Измерение фазового дрожания цифровым осциллографом. Измерение фазового дрожания фазовым детектором. Измерения фазового дрожания по критерию увеличения коэффициента ошибок.

Анализ оптического спектра. Интерферометр Фабри – Перо Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо. Их технические и метрологические характеристики\*.

Дифракционная решетка как оптический фильтр. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток: однопроходный монохроматор, двухпроходный монохроматор, монохроматор Литтмана. Основные технические и метрологические характеристики анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток\*.

Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны.

Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением в высокоскоростных цифровых линиях связи: гетеродинный метод измерения спектральных характеристик, автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик.

**Методические указания.** Материал можно изучать, используя [2,9-14].

### **2.1.6. Контроль волоконно-оптических линий связи**

Рефлектометрические измерения параметров оптических систем передачи. Оптические рефлектометры. Основные принципы построения и устройство рефлектометров. Технические и метрологические характеристики рефлектометров\*. Мини-рефлектометры.

Рефлектометр как многофункциональное средство измерений в оптических системах передач. Виды и методы измерений с помощью оптических рефлектометров. Измерение затухания, определение места повреждения кабеля, контроль стыков. Погрешности измерений.

Системы удаленного контроля оптических кабелей. Организация измерений с закрытием и без закрытия связи. Основные направления автоматизации контроля волоконно-оптических линий связи.

**Методические указания.** Материал можно изучать, используя [2,16, 17].

### **2.1.7. Поверка средств измерений оптического диапазона**

Общие принципы поверки средств измерений оптического диапазона. Рабочие эталоны, используемые при поверке СИ оптического диапазона. Погрешности рабочих эталонов.

**Методические указания.** Материал можно изучать, используя [4].

## **3. Лабораторные занятия**

Основными целями выполнения лабораторных работ являются:

- изучение устройства и принципа действия средств измерений оптического диапазона;
- приобретение студентами практических навыков в проведении измерений в оптическом диапазоне;
- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины «Метрология в оптических телекоммуникационных системах».

При выполнении лабораторных работ студент должен продемонстрировать знание соответствующего теоретического материала и знакомство с учебно-методической литературой по заданной теме.

### **Список лабораторных работ:**

1. Измерение характеристик фотоприемного устройства
2. Измерения затухания оптических волокон оптическим тестером
3. Изучение установки для сварки оптических волокон.
4. Изучение факторов, влияющих на информационно-пропускную способность ВОСП ( моделирование на ЭВМ)
5. Изучение оптического рефлектметра
6. Обработка рефлектограмм оптических волокон (моделирование на ЭВМ)

Продолжительность каждой лабораторной работы 4 часа.

Методические указания к лабораторным работам представлены в локальной сети кафедры СВЧиКР в разделе методических материалов профессора А.Е. Манделя.

## **4. Практические занятия**

Практические занятия позволяют закрепить в памяти студентов основные измеряемые параметры волоконно-оптических световодов, передающих и приемных модулей, основные методы измерений параметров аппаратуры волоконно-оптических систем передачи и параметров трактов цифровых

телекоммуникационных систем, основные технические и метрологические характеристики средств измерений в оптическом диапазоне.

### **Темы практических занятий:**

1. Статистическая оценка характеристик погрешности измерений
2. Параметры и характеристики волоконно-оптических световодов, передающих и приемных модулей. Методы их измерений.
3. Методы измерений параметров аппаратуры систем передачи
4. Методы измерений параметров цифровых трактов
5. Метод импульсной волоконно-оптической рефлектометрии
6. Системы удаленного контроля волоконно-оптических сетей связи.
7. Контрольная работа №1 «Основные методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи».
8. Контрольная работа №2 «Основные методы измерений параметров трактов цифровых оптических телекоммуникационных систем».

На практических занятиях студентами докладываются результаты выполнения творческих индивидуальных заданий (рефератов)

### **Темы индивидуальных заданий (рефератов)**

1. Генераторы оптических сигналов, их технические и метрологические характеристики.
2. Оптические ваттметры. Основные технические и метрологические характеристики.
3. Оптические тестеры. Основные технические и метрологические характеристики. Основные области применения.
4. Методы измерения диаметра модового поля оптических волокон
5. Измерение длины волны отсечки одномодовых волокон
6. Методы и схемы измерения дисперсии оптических волокон.
7. Анализаторы оптического спектра на основе дифракционной решетки  
Дифракционная решетка анализатора оптического спектра  
Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток
8. Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением
9. Рефлектометры. Основные принципы построения. Технические характеристики. Основные области применения.
10. Виды и методы измерений с помощью оптических рефлектометров. (Измерение затухания, определение места повреждения кабеля, контроль стыков и т.п.)
11. Измерители коэффициентов ошибок. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона.
12. Измерения дрейфа и дрожания фазы. Нормы джиттера. Метрология измерений джиттера

### 13. Контроль волоконно-оптических линий связи.

В качестве индивидуального творческого задания засчитывается выступление студентов с докладами на научных и научно-практических конференциях, семинарах, симпозиумах.

## 5. Контрольные работы

Целью контрольных работ является проверка знаний студентами основных положений изучаемого курса. При подготовке к контрольным работам удобнее всего пользоваться конспектами лекций и рекомендованными преподавателем учебниками, так как вопросы контрольных составляются на основе стандартной программы курса обучения. Ниже приведены основные вопросы контрольных работ.

### 5.1. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1

**ТЕМА: Основные методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи**

**Измерительные задачи, решаемые в процессе производства, строительства и эксплуатации оптических телекоммуникационных систем**

1. Виды измерений систем передачи.
2. Статистическая оценка характеристик погрешности измерений

**Параметры, измеряемые в оптических телекоммуникационных системах**

3. Основные измеряемые параметры оптических многомодовых волокон
4. Основные измеряемые параметры оптических одномодовых волокон
5. Основные измеряемые параметры оптических излучателей
6. Основные измеряемые параметры фотоприемных устройств
7. Основные измеряемые параметры каналов и трактов оптических телекоммуникационных систем.
8. Основные измеряемые параметры оптических усилителей

**Методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи**

9. Методы измерения абсолютной оптической мощности
10. Методы измерения затухания оптических волокон
11. Методы измерения числовой апертуры
12. Методы измерения диаметра модового пятна
13. Виды дисперсии оптических волокон
14. Методы и средства измерения межмодовой дисперсии

15. Методы и средства измерения хроматической дисперсии
16. Методы и средства измерения длины волны отсечки одномодовых волокон.
17. Принципы построения и основные технические и метрологические характеристики оптических ваттметров
18. Основные технические и метрологические характеристики оптических тестеров.

## **5.2. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2**

### **ТЕМА: Основные методы и средства измерений параметров трактов цифровых оптических телекоммуникационных систем**

#### **Методы и средства измерений параметров трактов цифровых оптических телекоммуникационных систем**

1. Критерии оценки качества передачи в высокоскоростных сетях связи
2. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона
3. Измерение коэффициентов ошибок с помощью псевдослучайной последовательности
4. Измерение энергетического потенциала линии связи с использованием анализатора коэффициента ошибок
5. Дрейф и дрожание фазы. Измерение фазового дрожания фазовым детектором.
6. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо. Их технические и метрологические характеристики
7. Дифракционная решетка как оптический фильтр. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток
8. Методы измерения спектральных характеристик с высоким разрешением в высокоскоростных цифровых линиях связи

#### **Контроль волоконно-оптических линий связи**

9. Теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.
10. Виды и методы измерений с помощью оптических рефлектометров.
11. Основные принципы построения и устройство оптических рефлектометров
12. Технические и метрологические характеристики оптических рефлектометров
13. Основные принципы построения системы контроля оптических сетей связи.
14. Системы удаленного контроля волоконно-оптических сетей связи.
15. Схема организации контроля оптических кабелей по пассивным оптическим волокнам.
16. Схема организации контроля оптических кабелей по активным оптическим волокнам.

#### **Проверка средств измерений оптического диапазона**

17. Общие принципы поверки средств измерений оптического диапазона  
 18. Рабочие эталоны, используемые при поверке СИ оптического диапазона

## **6. Экзаменационные вопросы**

Подготовка к экзаменам способствует систематизации, обобщению и закреплению знаний студентов, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий. Экзаменационный билет состоит из двух вопросов из нижеприведенного списка.

### **6.1. Список экзаменационных вопросов**

**Измерительные задачи, решаемые в процессе производства, строительства и эксплуатации оптических телекоммуникационных систем.**

1. Виды измерений систем передачи: настроечные, приемо-сдаточные, эксплуатационные плановые и эксплуатационные внеплановые.

2. Статистическая оценка характеристик погрешности измерений

**Параметры, измеряемые в оптических телекоммуникационных системах**

3. Основные измеряемые параметры оптических многомодовых и одномодовых волокон

4. Основные измеряемые параметры оптических излучателей

5. Основные измеряемые параметры фотоприемных устройств

6. Основные измеряемые параметры каналов и трактов оптических телекоммуникационных систем.

7. Основные измеряемые параметры оптических усилителей.

**Основные методы и средства измерений параметров аппаратуры систем передачи.**

8. Методы и средства измерения абсолютной оптической мощности

9. Методы и средства измерения затухания оптических волокон

10. Методы измерения числовой апертуры и диаметра модового пятна

11. Методы и средства измерения межмодовой дисперсии

12. Методы и средства измерения хроматической дисперсии

13. Методы и средства измерения длины волны отсечки одномодовых волокон.

14. Принципы построения и основные технические и метрологические характеристики оптических ваттметров и оптических тестеров.

**Основные методы и средства измерений параметров трактов цифровых телекоммуникационных систем**

15. Измерители коэффициентов ошибок. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона.
16. Методы измерения фазового дрожания.
17. Теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.
18. Виды и методы измерений с помощью оптических рефлектометров.
19. Технические и метрологические характеристики оптических рефлектометров
20. Основные принципы построения системы контроля оптических сетей связи.
21. Системы удаленного контроля волоконно-оптических сетей связи.
22. Схема организации контроля оптических кабелей по пассивным и активным оптическим волокнам.

## 6.2. Примеры ответов на экзаменационные вопросы

### При ответе на вопросы необходимо:

- дать описание измеряемого параметра;
- дать описание метода измерения;
- описать физический принцип работы средства измерения (схема, рисунок);
- привести основные технические характеристики средства измерения.

**Пример 1. Вопрос:** Методы и средства измерения затухания оптических волокон

Затуханием оптического волокна называется ослабление интенсивности света по мере распространения его в световоде. Затухание является наиболее важным параметром оптических волокон. Полное затухание оптического сигнала в световодах определяется коэффициентом затухания  $\alpha$ , который характеризует ослабление излучения за счёт собственного поглощения материала сердцевины, и наличия в волокне посторонних примесей, за счёт рассеивания световой энергии на неоднородностях, обусловленных малыми по сравнению с длиной волны флуктуациями показателя преломления оптического волокна, за счет скрутки, деформации и изгибов оптического волокна при изготовлении оптического кабеля.

Измеряют, как правило, коэффициент полного затухания оптического световода по мощности  $\alpha$ . Обычно  $\alpha$  выражается в децибелах и определяется по формуле

$$\alpha = 10 \lg[(P_0 I_S / (1 - \rho^2)) / P_L],$$

где  $P_0$  - оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на входе волокна;

$P_L$  - оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на выходе волокна;

$\rho$  - коэффициент отражения от входного торца волокна;



$I_S$  - эффективность ввода излучения в оптический световод.

При согласованном вводе и выводе излучения, к чему обычно стремятся на практике, приходим к традиционной формуле

$$\alpha = 10 \lg \left( \frac{P_0}{P_L} \right).$$

Измерение затухания оптического световода сложная научно-техническая задача. Однозначно определить коэффициент  $\alpha$  трудно. На воспроизводимость результатов влияют микро- и макроизгибы, изменения температуры и давления, способ возбуждения оптического волокна. В многомодовых волокнах измерение осложняется распространением большого количества мод в волокне, каждая из которых имеет собственные характеристики распространения. В связи с этим необходимыми условиями измерения затухания являются:

- 1) постоянство мощности оптического излучателя, его центральной длины волны  $\lambda$  и ширины спектра излучения  $\Delta\lambda$ , причем  $\Delta\lambda$  не должна превышать характеристику спектрального затухания волокна;
- 2) неизменность модового состава оптического излучения, что позволяет избежать потерь мощности в многомодовых волокнах за счет быстро затухающих мод высшего порядка;
- 3) вывод мод оболочки, что позволяет избежать их влияния на мощность оптического сигнала на выходе волновода.

Первое условие - постоянство характеристик источника излучения – обеспечивается выбором излучателя.

Второе условие - неизменность модового состава оптического излучения – выполняется в многомодовых волокнах только при достижении равновесного распределения мод. Эффективная длина установления равновесного распределения мод в волокне может составлять от сотен метров до нескольких километров и зависит от типа волокна, способа возбуждения, микро- и макроизгибов. Для формирования распределения мод, близкого к равновесному в коротких отрезках волокна, широкое применение находят смесители и фильтры мод. Известно несколько конструкций фильтров мод: спиральный фильтр мод, который образуется несколькими витками световода (3-5 витков), намотанных на стержень диаметром 15-40 мм; система штырей - гребенка, через которую оптическое волокно пропускается с небольшим радиусом изгиба. Хорошей эффективностью обладает биконический фильтр, образованный двойным конусным переходом световода через меньший размер на прежние параметры. Такой фильтр можно создать перетяжкой разогретого волокна на диаметр 0,6 от номинального на длине 1-2 мм.

Общим для всех смесителей и фильтров мод является обеспечение условий для сильной связи мод различных порядков на вызываемых внешними причинами макроизгибах и микронеоднородностях волокна, достижение равной мощности излучения во всех модах и неизменность модового состава.

Третье условие - вывод мод оболочки – обеспечивается обычно иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой равен или больше показателя преломления оболочки.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить коэффициент затухания – затухание на единицу длины волокна (дБ/км):

$$\beta(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{L},$$

которое не зависит от выбранной длины волокна.

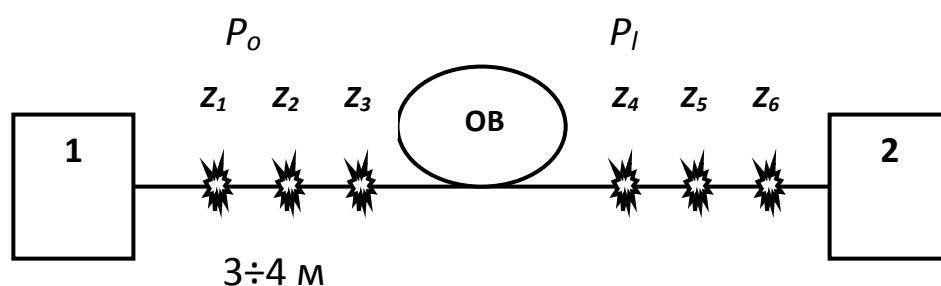
К настоящему времени согласно рекомендациям ГОСТ 26814-86 на практике применяются следующие методы измерения затухания: метод обламывания; безобломный метод (другое его название – метод вносимых потерь). Методы относятся к группе «точка-точка», при которых измеритель и источник размещаются по разные стороны тестируемого объекта. Схема измерения затухания методом обламывания приведена на рис.2.2.

Измерение выполняется следующим образом. Сначала фиксируются показания измерителя мощности при подключении к источнику излучения тестируемого волокна. Затем при выключенном источнике производится обламывание волокна на расстоянии ~3-4 м от источника и фиксируется торец отрезка на входе измерителя мощности. При включении излучателя вновь фиксируются показания измерителя. Потери (дБ) определяются как разность между эталонным уровнем  $\alpha_{\text{эт}}$  (на коротком отрезке) и уровнем измерения на всей длине волокне  $\alpha_{\text{изм}}$ :

$$\alpha = \alpha_{\text{эт}} - \alpha_{\text{изм}}$$

Для повышения точности при малом значении потерь измерение производят несколько раз, обламывая оптическое волокно в нескольких точках.

Если необходимо измерить значение удельного затухания  $\beta$ , то полученное затухание  $\alpha$  делится на длину волокна.

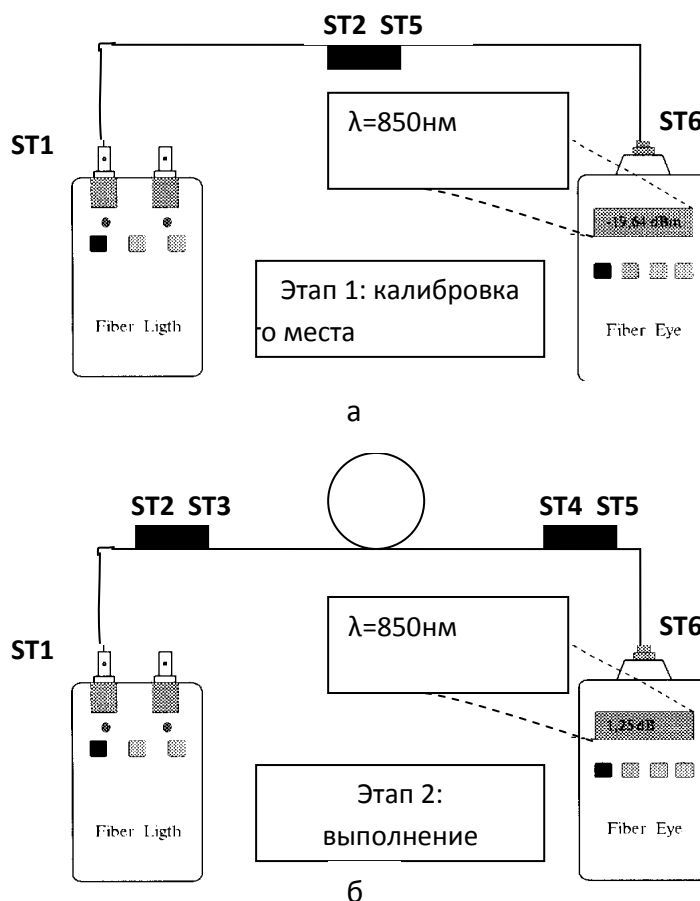


Измерение затухания методом обламывания

Метод обламывания является наиболее точным методом измерения затухания, сравнительно прост, но из-за необходимости разрыва волокна его использование при настройке и техническом обслуживании ВОЛС в полевых условиях неэффективно. Поэтому он применяется только при производстве оптических волокон.

Схема измерения затухания методом вносимых потерь приведена на рис.2.3. Согласно этому методу измерения осуществляются в два этапа. На

первом этапе (этап калибровки) производится измерение оптической мощности на выходе вспомогательного волокна (рис 2.3,а). Это может быть волокно того же типа, что и измеряемое, но длиной не более 2 м, чтобы можно было пренебречь его затуханием. На втором этапе, схема которого изображена на рис. 3.3,б, подсоединяется измеряемое волокно, и соединение регулируется по максимальному уровню мощности. Потери оптического излучения в волокне определяются как разность между эталонным уровнем мощности и уровнем второго измерения. Для увеличения точности измерения рекомендуется производить его в двух направлениях с усреднением полученного результата.



Измерение затухания методом вносимых потерь: а – этап калибровки; б – этап измерения

Метод вносимых потерь требует качественного соединения волокон и менее точен, чем предыдущий из-за погрешности, обусловленной непостоянством потерь в коннекторе при соединении кабелей. Однако этот метод не требует разрыва волокна и обычно используется в полевых условиях.

Отметим, что затухание оптического волокна, как и потери, вносимые в линию связи отдельными компонентами линии, есть всегда частное от деления двух уровней мощности. Поэтому при измерениях затухания или вносимых потерь точность измерения абсолютной мощности не важна. Важна погрешность определения отношения мощностей и, следовательно, в первую очередь необходима линейность характеристики фотоприемника.

Для определения затухания сигнала в кабельной системе линии и отдельных ее компонентах используются измерители оптических потерь (оптические тестеры). Оптическими тестерами называют приборы, в которых используются согласованные пары источник излучения – приемник (измеритель оптической мощности). Перечисленные в подразделе 2.4 приборы для измерения абсолютной мощности могут быть использованы и для измерения затухания.

**Пример 2. Вопрос:** Методы измерения длины волны отсечки одномодовых волокон

В оптическом волноводе могут распространяться два типа волн: симметричные  $E_{nm}$  и  $H_{nm}$ , у которых наряду с двумя поперечными имеется по одной продольной составляющей, и несимметричные волны, имеющие одновременно по две продольные составляющие, одна из которых  $EH_{nm}$  с преобладанием электрической составляющей, другая  $HE_{nm}$  с преобладанием магнитной составляющей. Индекс  $n$  здесь означает число перемен знака в поперечном распределении поля вдоль угловой координаты, индекс  $m$  – вдоль радиуса. Следует отметить, связывая электромагнитную теорию с лучевой теорией, что симметричные волны соответствуют меридианным лучам, а несимметричные – косым лучам.

Область существования каждой моды зависит от нормированной частоты оптического световода  $\nu$ :

$$\nu = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = \frac{2\pi R}{\lambda} NA,$$

где  $R$  – радиус сердцевины;  $NA$  – числовая апертура;  $\lambda$  – длина распространяющейся световой волны.

Так как для оптических волокон радиус  $R$  сердцевины, показатели преломления сердцевины  $n_c$  и оболочки  $n_u$  имеют постоянные значения, область изменений нормированной частоты определяется изменением длины волны  $\lambda$ .

Среди направляемых мод особое положение занимает мода  $HE_{11}$ , у которой критическое значение нормированной частоты  $\nu_{11} = 0$ . Это основная (фундаментальная) мода ступенчатого оптического волокна, так как она распространяется при любой частоте света и любых структурных параметрах волокна. С точки зрения геометрической оптики, мода  $HE_{11}$  образуется лучом, вводимым вдоль оси волокна, так как только характеристики такого луча не зависят от условий отражения на границе “сердцевина - оболочка”. Именно при работе на этой моде волокно называют одномодовым. Выбирая параметры оптического волокна, можно получить режим распространения одной только моды  $HE_{11}$ , что реализуется при условии

$$\nu = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} < 2,405.$$

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется только одна фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки. Значение длины волны отсечки определяется из выражения

$$\lambda_o = 2\pi R \sqrt{n_c^2 - n_u^2} / 2,405 .$$

Длина волны отсечки одномодового волокна определяет самую короткую длину световой волны, которую следует использовать. При более короткой длине световой волны  $\lambda < \lambda_o$  в волокне будут распространяться и другие моды, которые принято называть высшими.

Измерение длины волны отсечки осуществляется двумя методами: методом передаваемой мощности и методом контроля диаметра модового пятна.

Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности основано на измерении мощности светового излучения на выходе волокна в зависимости от длины волны. В качестве модулированного источника излучения используется перестраиваемый по длине волны лазер с шириной спектра, не превышающей 10 нм.

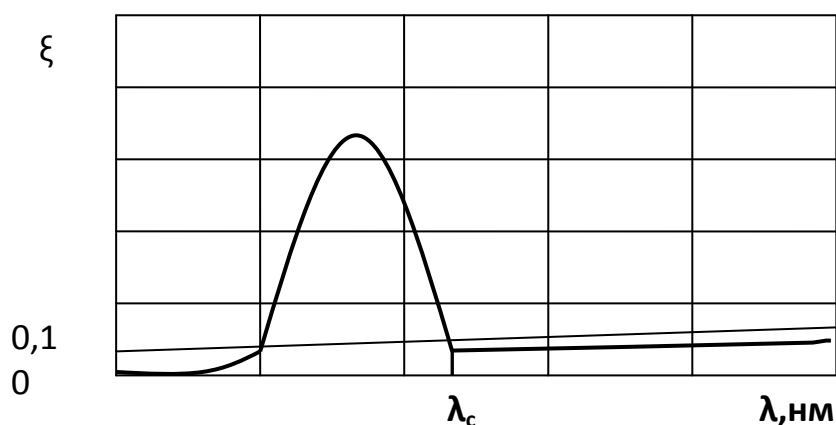
Метод заключается в сравнении сигнала, передаваемого по волокну небольшой длины, с образцовым сигналом, который получают на выходе либо испытываемого волокна, согнутого в кольцо диаметром менее 10 см ( метод изгиба), либо многомодового волокна длиной от 1 до 2 м.

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе проводят измерение оптической мощности  $P_1(\lambda)$  в испытываемом волокне небольшой длины (прямом либо слабо изогнутом). На втором этапе измеряют мощность  $P_2(\lambda)$  на выходе испытываемого волокна, изогнутого меньшим радиусом, обычно составляющим 3 см, или мощность  $P_3(\lambda)$  на выходе 1–2 м многомодового волокна. Выходную мощность регистрируют на каждой длине волны диапазона измерений, предположительно включающего длину волны отсечки. Отношение передаваемой мощности  $P_1(\lambda)$  к  $P_2(\lambda)$  или  $P_1(\lambda)$  к  $P_3(\lambda)$  рассчитывают согласно выражению

$$\xi = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)},$$

где  $i = 2$  или  $3$  в зависимости от метода.

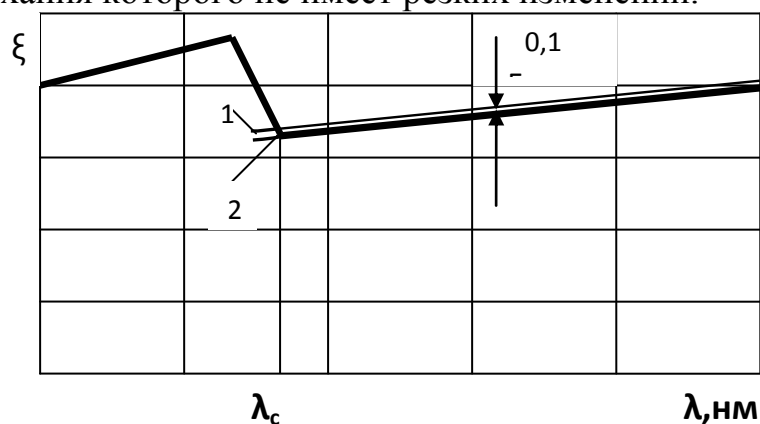
В первом методе длину волны отсечки  $\lambda_o$  определяют по максимальной длине волны, при которой  $\xi(\lambda) = 0,1$  дБ (рис.5.1).



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием одномодового волокна

Во втором методе длину волны отсечки  $\lambda_0$  определяют при пересечении прямой 1, проведенной на 0,1 дБ выше линейного участка 2 кривой  $\xi(\lambda)$  (рис.5.2).

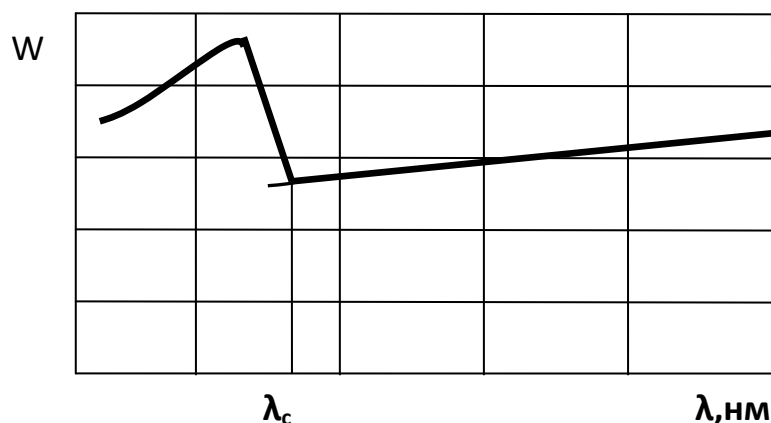
При переходе через длину волны, равную длине волны отсечки  $\lambda_0$ , в обоих случаях происходит изменение пропускания волокна. В первом методе - сильно изогнутого одномодового волокна за счет рассеяния на изгибах по сравнению с прямым или слабо изогнутым волокном, во втором методе - прямого одномодового волокна по сравнению с многомодовым, спектральная зависимость затухания которого не имеет резких изменений.



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием многомодового волокна

Применение для измерений коротких образцов связано с необходимостью уменьшения до минимально возможного влияния микроизгибов, под действием которых длина волны отсечки перемещается в коротковолновую область.

Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля основано на зависимости диаметра модового пятна  $W$  от длины волны передаваемой по волокну световой мощности.



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием модового пятна

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе измеряется диаметр модового пятна на выходном торце волокна в зависимости от длины волны. На втором этапе строится график, отражающий зависимость диаметра модового пятна от длины волны, и определяется длина волны отсечки.

## 7. Контрольные этапы и их максимальный рейтинг

### 7.1. Методика текущего контроля освоения дисциплины

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на **бально-рейтинговой системы оценки успеваемости**, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (раздел 7) и **итоговый** контроль.

**Правила формирования пятибалльных оценок** за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(\text{Сумма\_баллов,\_набранная\_к\_КТx}) * 5}{\text{Требуемая\_сумма\_баллов\_по\_балльной\_раскладке}}$$

**Итоговый контроль освоения** дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

**Формирование итоговой суммы баллов** осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

## 7.2. Применение рейтинговой системы контроля

### Распределения баллов по элементам контроля

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контроля, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Посещение лекций	24	2		1-17	<b>9</b>
Выполнение контрольных работ на практических занятиях	2	2	6	7, 13	<b>12</b>
Выполнение индивидуальных заданий	1	4	10	6-15	<b>10</b>
Выполнение и защита результатов лабораторных работ	6	4	5	6-17	<b>30</b>
Компонент своевременности				1-17	<b>9</b>
Сдача экзамена(максимум)					<b>30</b>
<b>Итого</b>					<b>100</b>

### Таблица распределения баллов в течение семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	3	3	3	<b>9</b>
Контрольные работы на практических занятиях		6	6	<b>12</b>
Выполнение индивидуальных заданий		10		<b>10</b>
Выполнение и защита результатов лабораторных работ		15	15	<b>30</b>
Компонент своевременности	3	3	3	<b>9</b>
<b>Итого максимум за период:</b>	<b>6</b>	<b>37</b>	<b>27</b>	<b>70</b>
Сдача экзамена (максимум)				<b>30</b>
<b>Нарастающим итогом</b>	<b>6</b>	<b>43</b>	<b>70</b>	<b>100</b>



## 8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи. М.: Эко-Трендз, 2006. - 268 с. (4 экз.).
2. Мандель А.Е. Методы и средства измерения в волоконно-оптических линиях связи. Учебное пособие. Томск, ТУСУР, 2006 г.-120 с. (22 экз.).
3. Современные проблемы волоконно-оптических линий связи: Справочник. Т. 4: Активные элементы и средства контроля ВОЛС. Под ред. В. Ф. Мышкина, В. А. Хана, А. В. Шмалько. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2005г. -371 с. (2 экз.)
4. Метрологическое обеспечение систем передачи: Учебное пособие для вузов. Б.П.Хромой, А.Л. Сенявский и др. под редакцией Б.П.Хромого. М.: Радио и связь.1991 г.-392 с. (3 экз.).
5. Бакланов И. Г. Технология измерений в современных телекоммуникациях. М.: ЭКО-ТРЭНДЗ, 1998. - 139 с. (2 экз.).
6. Волоконно-оптические системы передачи: Учебное пособие для вузов. . М. М. Бутусов, С. М. Верник и др. М.: “Радио и связь”, 1992 г.-414 с. (24 экз.).
7. А. Б. Иванов. Сравнительный анализ контрольно-измерительного оборудования ВОЛС. Вестник связи, № 1, 1998, с. 42-50.
8. Иванов А.Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Часть 1. - М.: Сайрус Системс, 2000. –376 с.
9. Шмалько А.В. Планирование и построение современных цифровых корпоративных сетей связи. – Вестник связи, 2000, №4, с. 58-65.
- 10.Шмалько А.В. Построение современных цифровых сетей связи: основные понятия, принципы и вопросы терминологии. – ВКСС. Connect! 2000, №2, с. 61-69.
- 11.Шмалько А.В., Сабинин Н.К. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. - ВКСС. Connect! 2000, №3, с. 50-62.
- 12.Симичев Н.И., Ермашов А.А., Шмалько А.В. Единая информационная сеть связи АО “Мосэнерго”. Рубежи и перспективы. - ИнформКурьер-Связь, 2000, №11, с. 47-50.
- 13.Колинько Т. Измерения в цифровых системах связи. Киев: Век+, НТИ, 2002, 320 с.
- 14.Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше. – М.: РАО “ЕЭС России”, 1999. –108 с.
- 15.Волоконно-оптическая техника; история, достижения, перспективы // Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000. - 376 с.
- 16.Родомиров Л., Скопин Ю.Г., Иванов А.Б. Методы и оборудование удаленного тестирования ВОЛС. - Вестник связи, 1998, №5, с. 64-71.

17. Некрасов С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей. – Технологии и средства связи, 2000, №5, с. 28-32.

**Учебное издание**

**Мандель Аркадий Евсеевич**

**Метрология в оптических  
телекоммуникационных системах**

Учебно-методическое пособие по  
организации самостоятельной работы студентов по дисциплине  
«Метрология в оптических телекоммуникационных системах»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.