Федеральное агентство связи
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге
(УрТИСИ СибГУТИ)

Д.В. Кусайкин

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов очной и заочной формы обучения
обучающихся по направлению
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
программа магистратуры «Сети, системы и устройства телекоммуникаций»
в соответствии с ФГОС ВО 3++

Екатеринбург
2019

ББК 32.883
УДК 621.391

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры ИСТ Денисов Д.В.

Кусайкин Д.В.
Волоконно-оптические системы передачи: Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов очной и заочной формы обучения направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»/ Д.В. Кусайкин. - Екатеринбург: УрТИСИ СибГУТИ, 2019. – 60 с.

Методические указания предназначены для студентов изучающих дисциплину «Волоконно-оптические системы передачи» и содержат сведения из теории, указания к оформлению отчета, контрольные вопросы для защиты и список рекомендуемой литературы.

Рекомендовано НМС УрТИСИ СибГУТИ в качестве методических указаний по выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

ББК 32.883
УДК 621.391

Кафедра Многоканальной электрической связи
©УрТИСИ СибГУТИ, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка	4
Лабораторная работа 1	6
Лабораторная работа 2	11
Лабораторная работа 3	18
Лабораторная работа 4	20
Лабораторная работа 5	25
Лабораторная работа 6	28
Лабораторная работа 7	30
Лабораторная работа 8	32
Лабораторная работа 9	37
Лабораторная работа 10	42
Приложение 1	48
Приложение 2	50
Приложение 3	52
Литература	60

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с утвержденной программой дисциплины «Волоконно-оптические системы передачи» и предназначены для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Проведение лабораторных работ предусмотрено для расширения и закрепления знаний по теоретическому курсу.

Выполнение работ необходимо проводить с пояснениями, расчетами и выводами. На каждую лабораторную работу оформляется отдельный отчет.

На проведение лабораторных работ в соответствии с программой отводится 52 часа.

Перечень лабораторных работ

№ п/п	№ раздела дисципли ны	Наименование лабораторных работ	Трудо-емкость (час.)
1	1	Исследование кодов Bi-0, RZ-AMI, NRZ-M, NRZ-L на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx	4
2	2	Четырех канальная технология волнового спектрального уплотнения WDM на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx	4
3	3	Оптические усилители	4
4	4	Исследование оптических фильтров на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx	4
5	5	Построение xWDM сетей	8
6	6	Технология плотного спектрального уплотнения DWDM	4
7	7	Технология грубого спектрального уплотнения CWDM	4
8	8	Исследование поляризационной модовой	4

		дисперсии PMD	
9	9	Исследование параметров xWDM систем при четырехволновом смешении	8
10	10	Перспективные методы модуляции ВОСП	8
ИТОГО			52

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование кодов Bi-0, RZ-AMI, NRZ-M, NRZ-L на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx

1 Цель работы:

1.1 Исследовать параметры и характеристики линейных кодов Bi-0, RZ-AMI, NRZ-M, NRZ-L.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3 Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер IBM PC.

3.2 Платформа NI ELVIS II с платой FOTEx.

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

4.3 Изучите теоретический материал приложения 1.

5 Порядок выполнения работы:

5.1. Включите питание NI ELVIS II, затем включите питание макетной платы.

5.2 Включите компьютер.

5.3 Запустите программу NI ELVISmx.

5.4 Найдите самый левый модуль Sequence Generator (Генератор последовательностей) с выходом X, и установите его DIP-переключатели в положение 00.

5.5 Соберите схему, показанную на рисунке 1.

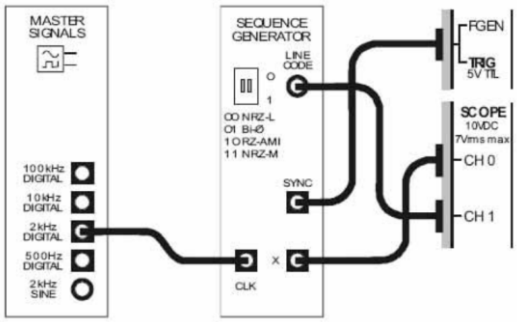


Рисунок 1 – Схема снятия временных диаграмм линейных кодов

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 2.

Импульсы с выхода SYNC генератора последовательностей соответствуют каждому первому биту последовательности при повторении кода и используются для запуска осциллографа.

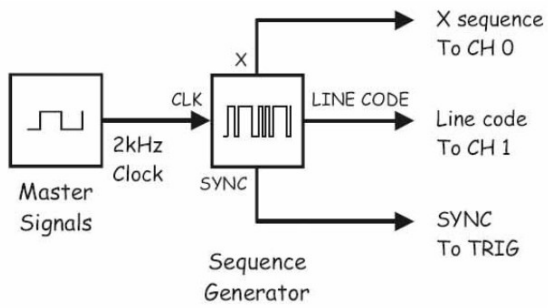


Рисунок 2 – Блок-схема снятия временных диаграмм линейных кодов

5.6 Запустите ВП осциллографа NI ELVIS II. Настройте осциллограф со следующими параметрами:

- Coupling (связь с источником сигнала) для обоих каналов: DC (по постоянному току);
- Timebase (масштаб по оси времени): 1 мс/дел;
- Trigger Type (Тип запуска): Digital (цифровой).

На осциллограмме появится фрагмент сигнала 31-битной последовательности.

5.7 Активируйте канал 1 осциллографа (установив флажок в окошке Enabled box), чтобы наблюдать одновременно сигналы на выходах X и LINE CODE генератора последовательностей.

5.8 Установите элемент управления осциллографа Vertical Position (смещение по вертикали) канала 1 в положение -3 В, чтобы разделить сигналы для удобства их сравнения.

5.9 Зарисуйте два сигнала в масштабе. Оставьте место еще для трех сигналов, обозначьте на графиках уровень 0 В каждого сигнала.

5.10 Выберите код Bi_0-L, установив DIP-переключатели Генератора последовательностей в положение 01. Зарисуйте осциллограмму кодового сигнала рядом с двумя другими, отметив уровень 0 В.

5.11 Выберите код RZ-AMI, установив DIP-переключатели Генератора последовательностей в положение 10, и зарисуйте осциллограмму сигнала рядом с другими.

5.12 Выберите код NRZ-M, установив DIP-переключатель Генератора последовательностей в положение 11, и зарисуйте осциллограмму сигнала рядом с другими.

5.13 Выберите код NRZ-L, установив DIP-переключатели Генератора последовательностей в положение 00. Закройте программу осциллографа. Запустите ВП Анализатора динамических сигналов NI ELVIS II. Установите следующие настройки анализатора сигналов:

- режим – RMS (среднеквадратическое значение);
- диапазон частот – 40кГц;
- разрешение (Resolution) – 400;
- окно (Window) – 7 Term B-Harris (Блэкмана – Харриса 7-го порядка);
- масштаб (Units) – dB.

5.14 Подсчитайте количество «лепестков» в спектре сигнала (в пределах 40 кГц) и запишите в таблицу 1. Повторите пункт 5.14 для других трех кодов.

Таблица 1 – Параметры спектра линейного кода

Метод кодирования	Количество лепестков (в пределах 40 кГц)
NRZ-L	
Bi_0-L	
RZ-AMI	
NRZ-M	

5.15 Установите генератор последовательностей на режим кодирования NRZ-L. Активируйте курсоры анализатора спектра (установив флажок в окне Cursors On). Установите один из курсоров на первую частоту с нулевой амплитудой (между первым и вторым лепестками спектра). Измерьте и запишите в таблицу 2 первую частоту с нулевой амплитудой сигнала. Повторите пункт 5.15 для других трех кодов.

Таблица 2 – Значения параметров первой гармонии

Метод кодирования	Частота первого нуля
NRZ-L	

Bi_0-L	
RZ-AMI	
NRZ-M	

5.16 Установите генератор последовательностей в режим кодирования NRZ-L.

5.17 Установите настройку Frequency Span (диапазон частот) анализатора сигналов на 3000 Гц вместо 40 000 Гц. С помощью курсора найдите в спектре кодированного сигнала гармонику с частотой сигнала битовой синхронизации. Определите относительное значение этой составляющей и запишите в таблицу 3. Повторите 5.17 для других трех кодов.

Таблица 3 – Частота синхроимпульсов

Метод кодирования	Частота синхроимпульсов (в децибелах)
NRZ-L	
Bi_0-L	
RZ-AMI	
NRZ-M	

Примечание: Относительное значение компонента в децибелах можно определить по пересечению горизонтальной линии курсора оси Y. Это размер компоненты в децибелах относительно самой большой составляющей закодированного сигнала.

5.18 Сделайте выводы по проделанной работе, и ответьте на контрольные вопросы.

5.19 Оформите отчет.

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.

6.2 Структурная схема исследуемого эксперимента.

6.3 Осциллограммы временных зависимостей линейных кодов.

6.4 Спектральные диаграммы линейных кодов.

6.5 Выводы по проделанной работе.

6.6 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1 Каково значение ширины спектра главного лепестка кода Bi-0, RZ-AMI, NRZ-M, NRZ-L?

7.2 На каких сетях применяется линейный код Bi-0, RZ-AMI, NRZ-M, NRZ-L?

7.3 У какого из линейных кодов FOTEx гармоника, соответствующая частоте сигнала битовой синхронизации, наибольшая?

7.4 Какой из линейных кодов FOTEx имеет вторую по величине гармонику, соответствующую частоте сигнала битовой синхронизации?

7.5 Какой из линейных кодов FOTEx имеет наименьшую по величине гармонику, соответствующую частоте сигнала битовой синхронизации?

7.6 Рассчитайте разность величин гармоник (в децибелах) между наилучшим и наихудшим линейным кодом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Четырехканальная технология волнового спектрального уплотнения WDM на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx

1 Цель работы:

1.1 Изучить основы построения технологии WDM.

1.2 Исследовать параметры двухканальной системы WDM.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3 Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер IBM PC.

3.2 Платформа NI ELVIS II с платой FOTEx.

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

4.3 Изучите теоретический материал приложения 2.

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Включите персональный компьютер и платформу NI ELVIS II с разрешения преподавателя.

5.2 Запустите программу NI ELVISmx.

5.3 Запустите виртуальный прибор NI ELVIS II Function Generator (Генератор функций). Установите частоту генератора функций равной 1 Гц.

Настройте функциональный генератор с помощью виртуальных элементов управления для получения сигнала со следующими параметрами:

- форма сигнала – синусоидальная;
- пиковая амплитуда – 0 В;
-смещение по постоянному току – 0 В.

5.4 Соберите схему как показано на рисунке 1.

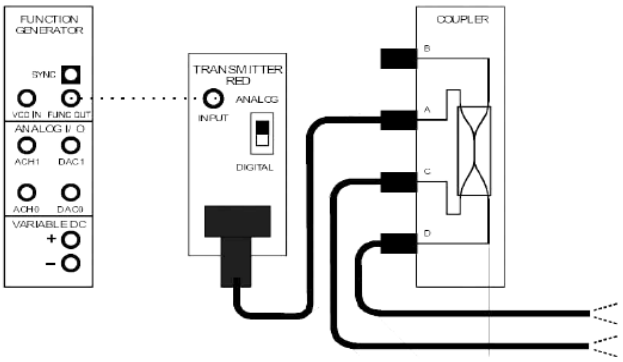


Рисунок 1 – Схема деления оптического сигнала

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 2. На вход передатчика с красным светодиодом подается низкочастотная синусоида с генератора функций. Выход передатчика подключен к порту А разветвителя.

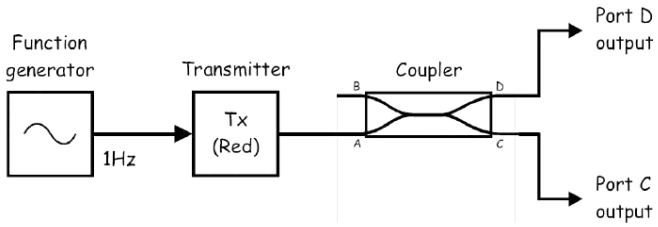


Рисунок 2 – Блок-схема деления оптического сигнала

Направьте свободный конец оптического проводника на стол, стену и т.п. Сравните яркость светового сигнала на выходах.

5.5 Измените схему, как показано на рисунке 3.

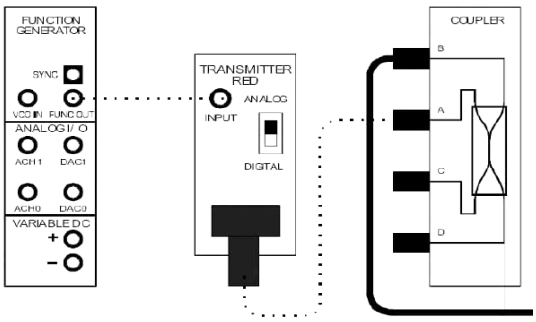


Рисунок 3 – Схема измерения мощности оптического сигнала на портах разветвителя

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 4. Она практически такая же, как в предыдущем эксперименте, только наблюдать теперь будем выход порта B.

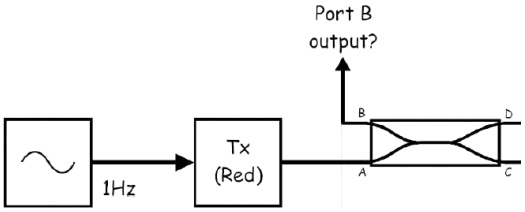


Рисунок 4 – Блок-схема измерения мощности оптического сигнала на портах разветвителя

Направьте свободный конец оптического проводника на стол, стену и т.п.

5.6 Выберите один из приемников и установите его элемент управления Gain Range (Диапазон усиления) на LO. Поверните регулятор Variable Gain (Регулируемый коэффициент усиления) приемника по часовой стрелке до упора.

Примечание: Эти две настройки модулей приемников устанавливают одинаковые уровни усиления.

5.7 Увеличьте частоту сообщения до 1000 Гц. Измените схему, как показано на рисунке 5.

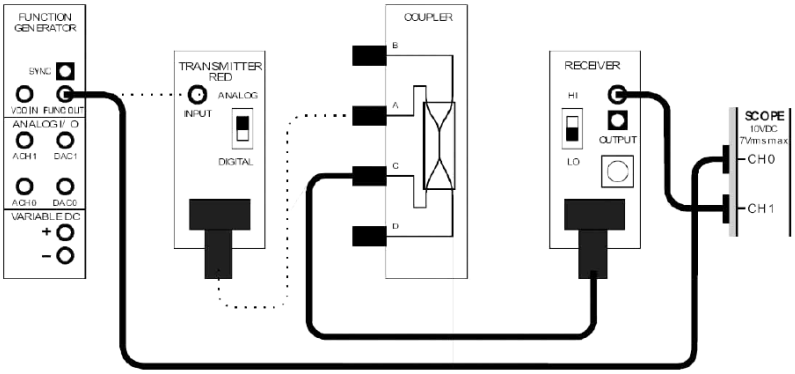


Рисунок 5 – Схема передачи сигнала с порта A на порт C

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 6. Аналоговый сигнал, моделируемый генератором функций, преобразуется в свет передатчиком с красным светодиодом и передается в порт A разветвителя. Разветвитель разделяет оптический сигнал на два сигнала, доступные на портах C и D. С порта C сигнал поступает на вход приемника.

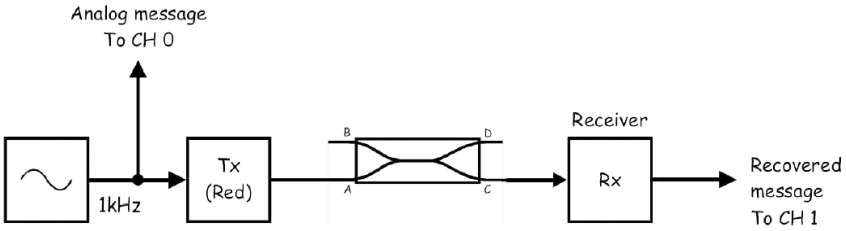


Рисунок 6 – Блок схема передачи сигнала с порта A на порт C

5.8 Запустите виртуальный осциллограф. Измерьте пиковую амплитуду сигнала на выходе приемника. Запишите полученное значение в таблицу 1.

Таблица 1 – Значение сигнала на выходе разветвителя

Сигнал с порта C	Сигнал с порта D

Измените, подключение канала 1, как показано на рисунке 7, используя тот же модуль приемника.

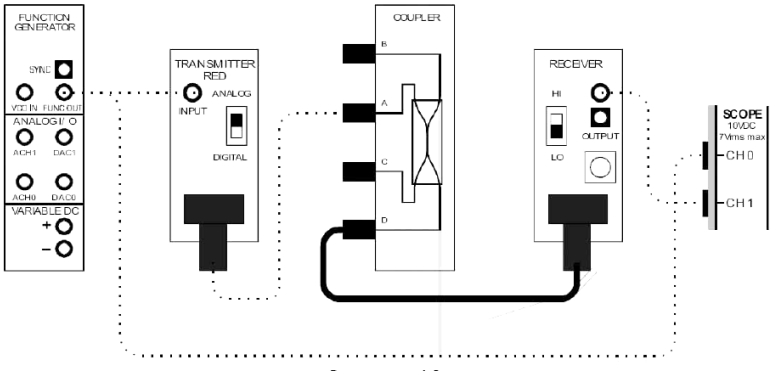


Рисунок 7 – Схема передачи сигнала с порта A на порт D

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 8.

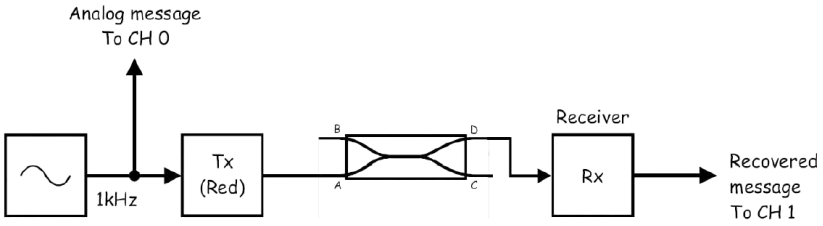


Рисунок 8 – Блок-схема передачи сигнала с порта A на порт D

Рассмотрите осциллограммы сигналов сообщения и его копии. Измерьте амплитуду сигнала на выходе приемника. Запишите полученное значение в таблицу 1.

5.9 Выберите один из передатчиков с красным светодиодом и установите его переключатель режимов Mode в положение ANALOG (Аналоговый). Установите переключатель режимов Mode другого передатчика с красным светодиодом в положение DIGITAL (Цифровой). Установите элемент управления Gain Range (Диапазон усиления) обоих приемников на LO. Поверните регулятор Variable Gain (Регулируемый коэффициент усиления) обоих приемников по часовой стрелке до упора.

5.10 Соберите схему, как показано на рисунке 9.

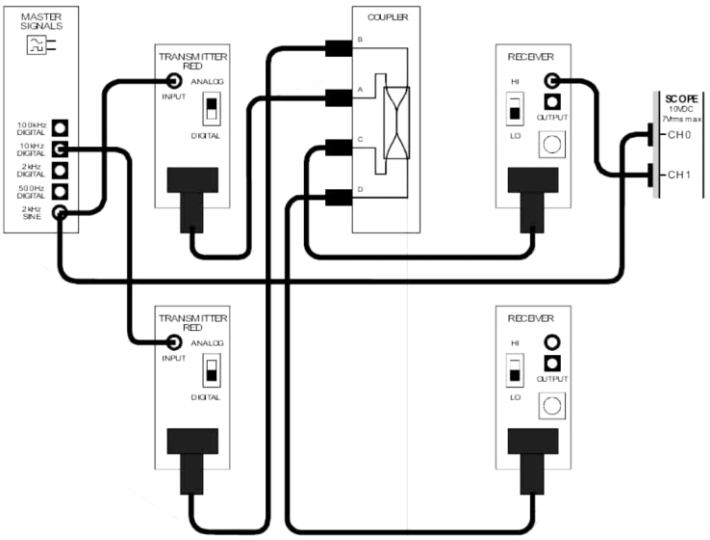


Рисунок 9 – Схема мультиплексирования двух оптических сигналов

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 10. Два передатчика с красными светодиодами используются для преобразования в свет двух сигналов (аналогового и цифрового). Эти сигналы поступают на порты A и B разветвителя и одновременно доступны на портах C и D.

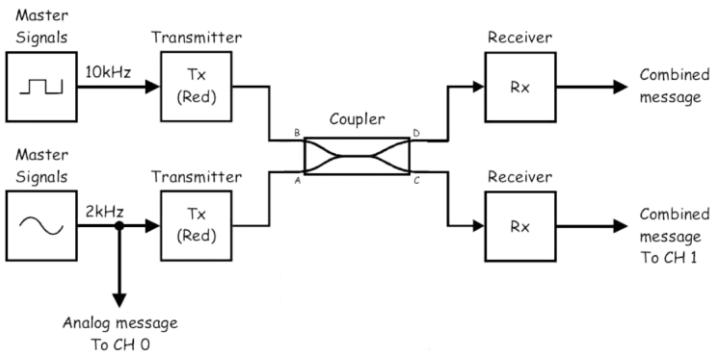


Рисунок 10 – Блок-схема мультиплексирования двух оптических сигналов

5.11 Настройте осциллограф со следующими параметрами: timebase (Масштаб по оси времени): 100 мкс/дел. вместо 500 мкс/дел. Измените подключение канала осциллографа, как показано на рисунке 11.

5.12 Зарисуйте осциллограммы сигналов на входе и выходе разветвителя.

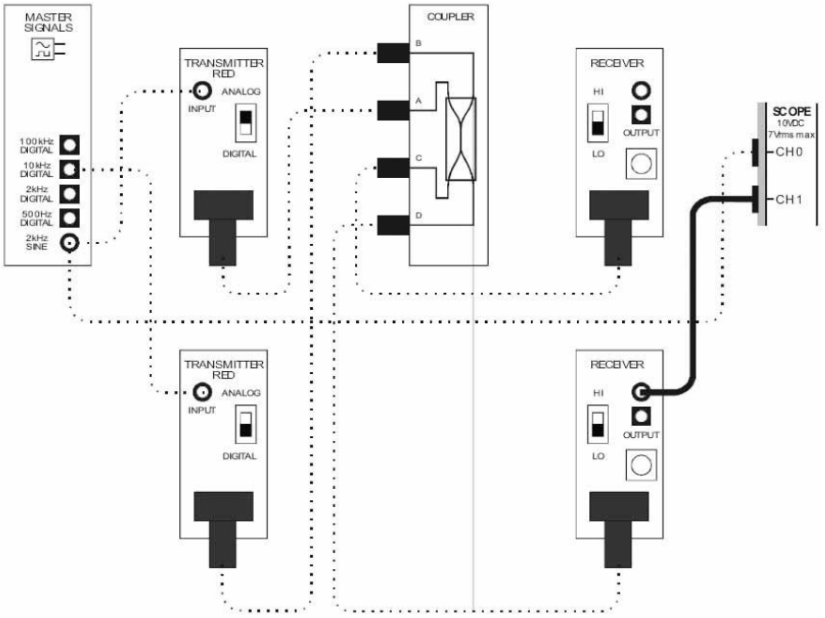


Рисунок 11 – Схема снятия осциллограммы оптического сигнала с выхода фотоприемника

5.13 Дополнительное задание. Соберите схему мультиплексирования двух оптических сигналов, используя разветвитель и/или оптический фильтр. Зарисуйте осциллограммы сигналов (передающих и принимающих) в одном масштабе. Сделайте выводы по проделанной работе.

5.14 Ответьте на контрольные вопросы.

5.15 Оформите отчет.

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.

6.2 Структурная схема исследуемого эксперимента.

6.3 Временные диаграммы сигналов на входе и выходе системы WDM.

6.4 Расчет затухания оптических разветвителей, оптических фильтров.

6.5 Выводу по проделанной работе.

6.6 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1 Что такое разветвитель?

7.2 Назовите основные компоненты системы WDM.

7.3 Какие типы оптических мультиплексоров применяют в системах WDM?

7.4 Какие типы оптических демультиплексоров применяют в системах WDM?

7.5 Что такое транспондер?

7.6 Какие типы оптических волокон используют для организации систем xWDM?

7.7 Какие типы оптических усилителей применяют на системах DWDM и CWDM?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Оптические усилители

1 Цель работы:

1.1 Исследовать параметры оптических усилителей

1.2 Закрепить и проверить полученные знания студентов по изученному материалу.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3 Подготовка к работе:

3.1 Повторить материал по темам «Оптические усилители (ОУ) (полупроводниковые и на активном оптическом волокне)»

3.2 Подготовить бланк отчета для лабораторной работы.

4 Основное оборудование:

4.1 Персональный компьютер

4.2 Прикладная программа «Оптические усилители. Лабораторная работа»

4.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы «Оптические усилители» по дисциплине «Волоконно-оптические системы передачи»

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Запустить программу «Оптические усилители»

5.2 Пройти тест допуска.

5.3 Изобразить структурную схему оптического усилителя EDFA, пояснить назначение блоков.

5.4 Рассчитать коэффициент усиления. Исходные данные представлены

электронной версии программы. Номер варианты выбирается по журналу. Записать результаты расчетов с пояснениями к формулам.

5.5 Исследовать спектральную характеристику оптического усилителя. Для этого, в соответствующем меню программы (пункт 3), щелчком левой клавишей мыши, перейдите к табличным значениям. По табличным значениям постройте график зависимости P(λ). Измерьте ширину полосы усиления на уровне половины от максимальной мощности усиления.

5.6 Исследуйте динамический диапазон оптического усилителя. Для этого, перейдите в пункт 4 меню программы. Выберите по возрастанию десять произвольных значений коэффициента усиления. Заполните таблицу 1.

Таблица 1 – Результат измерения уровня выходной мощности от входной при различных коэффициентах усиления

	1	2	3	4	5	6	7	…	10
G, дБ									
$P_{вх}$, Вт									
$P_{вых}$, Вт									

По табличным значениям (таблица 1) построить график зависимости $P_{вых}(P_{вх})$. По графику определить порог насыщения и динамический диапазон. Сделать выводы.

5.7 Изучить пункт 5 программного продукта.

5.8 Пройти тест контроля остаточных знаний, результат показать преподавателю.

5.9 Оформить отчет.

6 Содержание отчета:

6.1 Название и цель работы

6.2 Структурная схема оптического усилителя EDFA

6.3 Результаты расчетов коэффициента усиления.

6.4 Графики зависимости P(λ) и $P_{вых}(P_{вх})$

6.5 Выводы по проделанной работе.

6.6 Ответы на контрольные вопросы

7. Контрольные вопросы

7.1 Назначение оптического усилителя EDFA?

7.2 Назовите основные характеристики усилителя EDFA?

7.3 На какие виды делятся оптические усилители в зависимости от их места установки.

7.4 На какие типы делятся оптические усилители по конструктивному исполнению?

7.5 На каких транспортных сетях можно использовать усилитель EDFA и почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование оптических фильтров на базе аппаратно программного комплекса NI ELVIS Emona - FOTEx

1 Цель работы:

1.1 Исследовать влияния оптического фильтра на оптический сигнал различной мощности и частоты.

1.2 Получить навык работы с оборудованием NI ELVIS Emona FOTEx.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3 Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер IBM PC.

3.2 Платформа NI ELVIS II с платой расширения FOTEx.

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Включите персональный компьютер разрешения преподавателя.

5.2 Включите питание NI ELVIS II, выключатель расположен на задней стенке устройства, затем включите питание макетной платы, этот выключатель расположен в правом верхнем углу рядом с индикатором питания.

5.3 Запустите программу NI ELVISmx.

5.4 Запустите виртуальный прибор NI ELVIS II Function Generator (Генератор функций).

5.5 Настройте функциональный генератор с помощью виртуальных элементов управления для получения сигнала со следующими параметрами:

- Waveshape (Форма сигнала): Sine (Синусоидальная);
- Frequency (Частота): 1 Гц;
- Amplitude (Пиковая амплитуда): 5 В;
- DC Offset (Смещение по постоянному току): 0 В.

5.6 Выберите один из передатчиков с красным светодиодом и установите его переключатель режимов «Mode» в положение «ANALOG» (Аналоговый).

5.7 Соберите схему, показанную на рисунке 1.

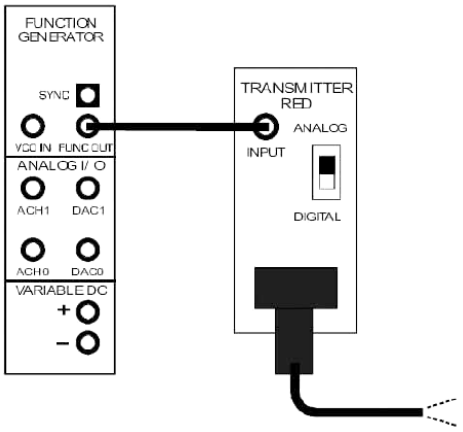


Рисунок 1 – Схема подключения генератора сигнала в оптическом передатчике

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 2. На входе передатчика с красным светодиодом подается низкочастотная синусоида с выхода генератора функций.

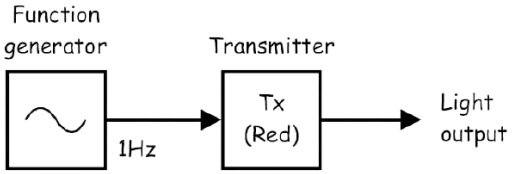


Рисунок 2 – Блок-схема подключения генератора сигнала в оптическом передатчике

Направьте свободный конец оптического проводника на стол, стену, лист бумаги или свою ладонь, чтобы увидеть свет на конце проводника.

Убедитесь, что красный свет на конце проводника пульсирует примерно раз в секунду.

5.8 Измените схему, как показано на рисунке 3.

Примечание: пунктирные линии означают уже выполненные соединения.

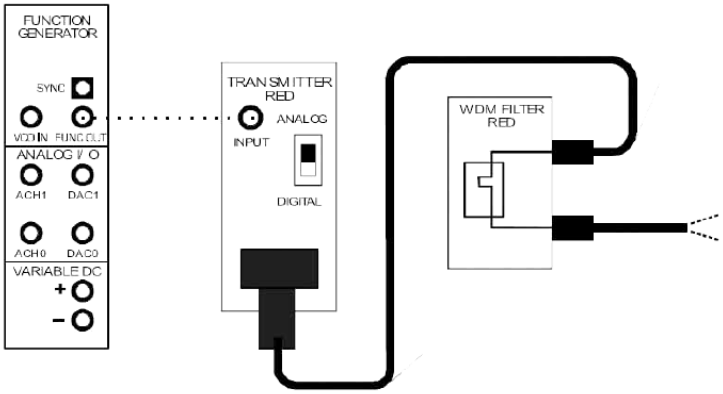


Рисунок 3 – Схема фильтрации оптического сигнала

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 4. Выход передатчика с красным светодиодом подключен к входу красного WDM-фильтра.

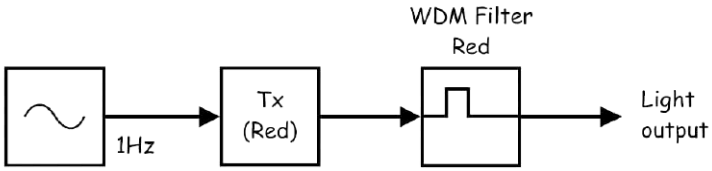


Рисунок 4 – Блок-схема фильтрации оптического сигнала

Примечание: на выходе фильтра Вы снова должны увидеть красный свет, пульсирующий примерно раз в секунду.

5.9 Увеличьте частоту сообщения (то есть сигнала на выходе генератора функций) до 1000 Гц.

5.10 Выберите один из приемников и установите его элемент управления Gain Range (Диапазон усиления) на LO. Поверните регулятор Variable Gain (Регулируемый коэффициент усиления) этого приемника по часовой стрелке до упора.

5.11 Соберите схему, как показано на рисунке 5, используя выбранный приемник и красный WDM-фильтр.

Выполненные соединения можно представить блок-схемой, изображенной на рисунке 6. Для моделирования аналогового сообщения используется генератор функций. Передатчик с красным светодиодом преобразует сообщение в свет и передает его по оптоволоконному кабелю на красный WDM-Фильтр, где сигнал фильтруется, после чего поступает на приемник и преобразуется обратно в электрический сигнал.

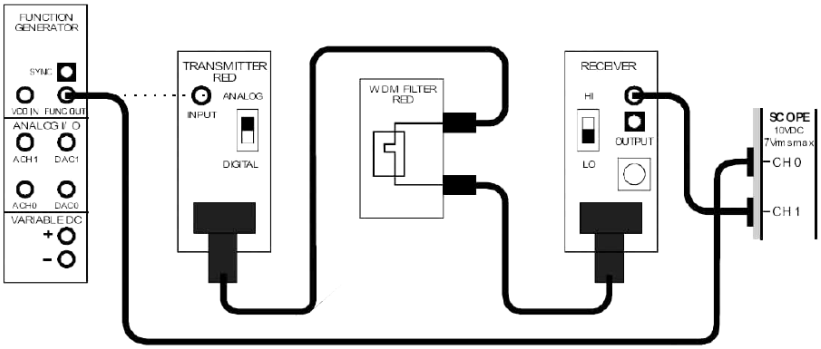


Рисунок 5 – Схема фильтрации RED фильтра

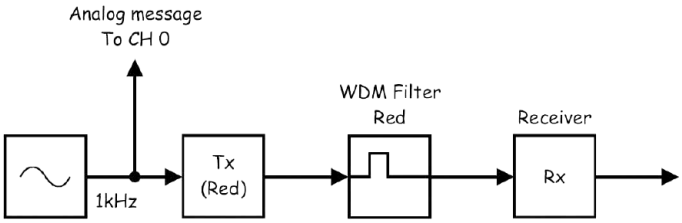


Рисунок 6 – Блок-схема фильтрации RED фильтра

5.12 Запустите ВП осциллографа NI ELVIS II. Активируйте канал 1 осциллографа (поставив флажок в окне Cursors On), чтобы одновременно наблюдать сигнал на выходе приемника и сигнал исходного сообщения. Зарисуйте осциллограммы передающего и принимающего сигнала.

Измерьте уровень сигнала на входе и выходе фильтра мультиметром, меняя значения уровня сигнала с шагом 1В, результаты занесите в таблицу 9.1.

Меняя частоту сигнала f = 10кГц, 100кГц, 200кГц, 500кГц, 1МГц, повторите пункт 4.12.1, результаты занесите в таблицу 1.

Примечание: Сигнал на выходе приемника должен представлять собой копию сообщения.

Таблица 1 – Зависимость уровень сигнала от частоты

U, В f, кГц	8	7	6	5	4	3	2	1
1								
10								
100								
200								
500								
1000								

5.13 Замените красный WDM-фильтр зеленым, как показано на рисунке 7.

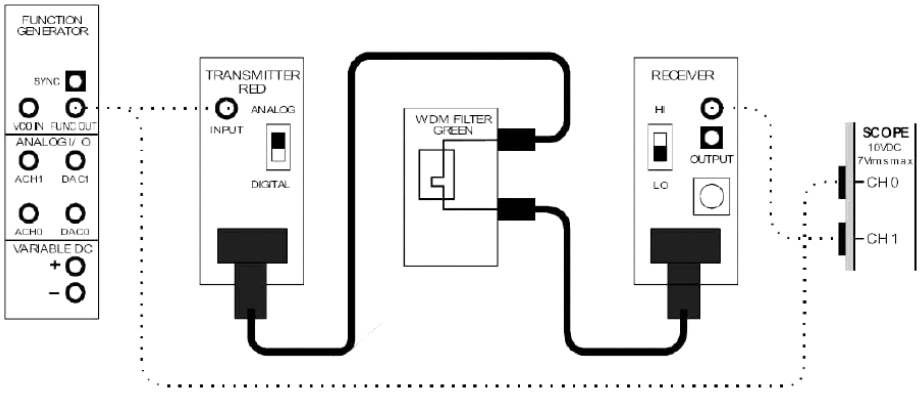


Рисунок 7 - Схема фильтрации GREEN фильтра

С помощью осциллографа наблюдайте за новым выходным сигналом приемника. Проделайте пункт 5.12.

5.14 Ответьте на контрольные вопросы.

5.15 Оформите отчет.

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.

6.2 Структурная схема снятия ВАХ оптических фильтров.

6.3 Временные диаграммы сигнала на входе и выходе оптического фильтра.

6.4 Расчет затухания оптического фильтра.

6.5 График зависимости P(λ) для двух вариантов единицы измерения мощности сигнала: «Вт» и «дБ».

6.5 Выводы по проделанной работе

6.6 Ответы на контрольные вопросы

7 Контрольные вопросы:

7.1 Для чего применяют оптические фильтры в оптических сетях.

7.2 Какие типы оптических фильтров применяются в оптических системах?

7.3 Объясните, почему красный свет все равно проходит через зеленый фильтр, но с меньшим уровнем.

7.4 Возможно ли использовать оптические фильтры в качестве демультиплексора?

7.5 Влияет ли оптический фильтр на уровень мощности оптического сигнала в процессе передачи/приема?

7.6 В каких транспортных сетях применяют оптические фильтры?

7.7 К каких устройствах системы xWDM применяются оптические фильтры?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Построение xWDM сетей

1. Цель работы:

1.1 Изучение основ проектирования волоконно-оптических систем передачи со спектральным уплотнением каналов.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3. Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер с установленной операционной системой Windows 7 (SP1), Windows 8 или Windows 10.

3.2 ПО – электронная лабораторная работа.

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

4.3 Ответить на вопросы допуска к лабораторной работе:

1) Сравнение CWDM и DWDM. Преимущества и недостатки каждой.

2) Как осуществить возможность построения линий большой протяженности без промежуточных регенерационных пунктов?

3) Как свести к минимуму влияние хроматической дисперсии в линиях связи протяженностью от 100 км?

4) В чем разница между OADM и ROADM?

5) Для чего предназначен анализатор спектра сетей CWDM/DWDM?

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Запустить программу.

5.2 Ознакомиться с теоретическим материалом в разделе «Подготовка».

5.3 Выполнить задание №1: сопоставить изображение оборудования с его назначением в сети.

5.4 В отчет кратко занести основные элементы получившейся системы и их назначение.

5.5 Выполнить задание 2:

- соединить и сопоставить SFP-модули с портами DWDM-мультиплексора;
- соединить между собой мультиплексор и два мультиплексора ввода-вывода;
- определить каналы для вывода в промежуточных пунктах. Вывести каналы 10G Ethernet;
- определить параметры подключения линии к усилителю;
- определить какие порты будут задействованы на мультиплексоре в оконечном пункте;
- в отчет занести схему получившейся сети с указанием оборудования, длин волн портов, источников и приемников излучения;

5.6 Выполнить задание 3: получить доступ к веб-интерфейсу анализатора спектра, рассчитать предложенные величины, исходя из графика. В отчет занести таблицу с результатами расчета физических величин.

5.7 Выполнить задание №4: рассчитать предложенные параметры линии связи, построенной по принципу DWDM поверх CWDM. В таблицу 4.1 занести результаты расчетов, сделать выводы о режиме функционирования системы.

Таблица 4.1 – Результат выполнения задания

Точка	Уровень сигнала, дБм	Суммарная мощность сигнала, дБм	PMD, пс/км
A			
B			
C			
D			
E			
F			
G			
H			

5.8 Пройти итоговый тест и показать результат преподавателю. Лабораторная работа считается выполненной, если количество выполненных заданий – 4 и пройден итоговый тест.

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.

6.2 Структурная схема исследуемого эксперимента.

6.3 Осциллограммы временных зависимостей линейных кодов.

6.4 Спектральные диаграммы линейных кодов.

6.5 Выводы по проделанной работе.

6.6 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1.Какой фактор ограничивает рабочий диапазон оптических волокон на длинах волн свыше 1675 нм?

7.2.Какие типы источников излучения используются в CWDM?

7.3.Какие типы фотоприемников излучения используются в CWDM?

7.4.Принцип работы мультиплексоров AWG.

7.5.Компоненты систем CWDM и их назначение.

7.6.Как возможно увеличить протяженность линии в системах CWDM?

7.7.Какие типы усилителей используются при построении систем CWDM?

7.8.Какие рекомендации определяют основные параметры систем спектрального уплотнения?

7.9.Укажите диапазон рабочих длин волн рамановских оптических усилителей.

7.10. С помощью какого устройства возможно свести влияние хроматической дисперсии к минимуму?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Технология плотного спектрального уплотнения DWDM

1. Цель работы:

1.1 Изучение принципов работы, основных параметров и функционального назначения оборудования DWDM-систем.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3. Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер с установленной операционной системой Windows 7 (SP1), Windows 8 или Windows 10.

3.2 ПО – электронная лабораторная работа.

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

5 Выполнение работы:

Лабораторная работа содержит тест и две задачи. Для начала необходимо изучить теоретический блок, зафиксировать в отчете необходимую информацию и только потом перейти к тестированию. Успешное прохождение теста позволит приступить к выполнению практических заданий. Если практическое задание выполнено верно, то можно приступить к выполнению следующего, если же нет, то задание нужно будет выполнить еще раз.

Порядок выполнения работы:

5.1 Запустить программу.

5.2 Ознакомиться с теоретическим материалом в разделе «Теория».

5.3 Пройти тест для проверки знаний по теоретической части темы

5.4 Выполнить задание №1. Сделать вывод по полученным результатам
5.5 Выполнить задание №2. Сделать вывод по полученным результатам

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.
6.2 Структурная схема системы DWDM.
6.3 Канальный частотный план DWDM
6.4 Результаты выполненных заданий
6.5 Выводы по проделанной работе.
6.6 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1. Какие технологии цифрового мультиплексирования используются в
7.2. ВОСП?
7.3. Какие компоненты входят в состав структуры многоканальной ВОСП WDM?
7.4. Какие типы источников излучения используются в DWDM?
7.5. Какие преимущества имеют волокна G.655, G.656 для организации каналов WDM?
7.6. Какие диапазоны волн в одномодовых волокнах предусмотрены для
7.7. плотного мультиплексирования DWDM?
7.8. Компоненты систем DWDM и их назначение.
7.9. Какой межканальный интервал в ВОСП–WDM нужно выбрать (10 ГГц, 25 ГГц, 50 ГГц, 100 ГГц) для большей дистанции передачи при максимальном числе каналов?
7.10. Влияние каких нелинейных эффектов критично для DWDM систем?
7.11. Укажите диапазон рабочих длин волн эрбиевых оптических усилителей.
7.12. Как возможно увеличить протяженность линии в системах CWDM и в DWDM?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Технология грубого волнового спектрального уплотнения CWDM

1 Цель работы:

1.1 Изучить принципы построения систем передачи с грубым спектральным уплотнением CWDM.

1.2 Изучить компонентов системы грубого спектрального уплотнения CWDM.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г

3 Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер IBM PC.

3.2 Программное обеспечение «Технология грубого волнового спектрального уплотнения».

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций, литературе и приложения 4.

4.2 Подготовить бланк отчета.

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Включить питание ПК.

5.2 Запустите exe файл лабораторной работы.

5.3 Ответьте на вопросы теста допуска.

5.4.Зарисуйте схему сети CWDM с канальным частотным планом.

5.5. Изучите компоненты системы CWDM.

5.5.1 Лазерные диоды в системе CWDM.

5.5.2 Оптические мультиплексоры, демультиплексоры в системе CWDM.

5.5.3 Транспондеры в системе CWDM. Структурная схема транспондера,

назначение блоков.

5.5.4 Оптические усилители в системе CWDM. Таблица характеристик оптических усилителей. Схема оптического романовского усилителя, назначение блоков, принцип работы.

5.5.5 Интерфейсы в системе CWDM.

5.6 Решить задачи представленные в программе, с пояснениями и расчетами.

5.7 Ответьте на контрольные вопросы. Результат тестирования покажите преподавателю.

5.8 После завершения лабораторной работы закройте программу и сделайте выводы.

6 Содержание отчета:

6.1 Название и цель работы.

6.2 Структурная схема системы CWDM.

6.3 Решение задач.

6.4 Амплитудно-волновая характеристика оптических усилителей, зависимости показать на одном графике.

6.5 Временные диаграммы работы транспондера в режимах 2R и 3R для систем CWDM и DWDM на одном графике.

6.6 Ответов на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1 Что такое технология CWDM.?

7.2 Какой шаг мультиплексирования в системе CWDM?

7.3 Сколько оптических каналов можно мультиплексировать в системе CWDM?

7.4 Что такое транспондер?

7.5 Какие типы транспондеров применяют в системе CWDM?

7.6 Какие типы оптических усилителей применяют в системах CWDM?

7.7 Какие типы оптических мультиплексоров применяют в системе CWDM?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Исследование поляризационной модовой дисперсии PMD

1 Цель работы:

1.1 Оценка коэффициента поляризационной модовой дисперсии при физическом воздействии на оптоволокно или кабель.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3. Основное оборудование:

3.1 Программное обеспечение лабораторной работы «Исследование поляризационной модовой дисперсии».

3.2 Персональный компьютер.

4. Подготовка к работе:

4.1 Детально изучить причины возникновения составляющих поляризационной модовой дисперсии. Располагать информацией по способам оценки составляющих и результирующей этой дисперсии.

4.2 Сделать заготовку отчета по лабораторной работе (каждый студент индивидуально) в соответствии с предъявляемыми требованиями. Заготовка должна обязательно содержать наименование лабораторной работы, формулировку цели работы, программу работы.

4.3 Подготовить устные ответы на контрольные вопросы:

4.3.1 Что является причиной ограничения ширины полосы пропускания оптического волокна?

4.3.2 Какова размерность поляризационной модовой дисперсии?

4.3.3 Влияет ли дисперсия на полосу пропускания ОВ?

4.3.4 Причина возникновения поляризационной модовой дисперсии?

4.3.5 По какой формуле в можно рассчитать поляризационную модовую дисперсию;

4.3.6 Какой вид имеет зависимость поляризационной модовой дисперсии от длинны волны?

4.3.7 Влияет ли поляризационная модовая дисперсия на длину участка регенерации, если да, то как?

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Исследование зависимости коэффициента PMD от растягивающей нагрузки.

Выбрать кабель AS Cable 36F (36 оптических волокон в кабеле) для исследования, установив метку напротив него. Длина кабеля составляет 4 км, кабель находится в катушке, растягивающая нагрузка прикладывается к секции длиной 150 м.

Провести измерение зависимости коэффициента PMD от растягивающей нагрузки. Начальное значение нагрузки должно находиться в пределах от 0 до 350 Кгс и выбирается самостоятельно. Шаг измерений также выбирается самостоятельно, должен составлять от 10 до 50 Кгс. Для измерения ввести значение растягивающей нагрузки ($F_{раст}$, кгс) в специальное поле, измерить значение PMD нажатием на кнопку «Измерить». Внести данные в отчёт.

Произвести измерения для десяти значений растягивающей нагрузки. Построить график. Нажать кнопку «Построить график» и сравнить его с полученным.

Обнулить все значения нажатием на кнопку «Сброс».

Выбрать кабель DD-G Cable 24F (24 оптических волокон в кабеле) для исследования, установив метку напротив него.

Произвести аналогичные измерения зависимости коэффициента PMD от растягивающей нагрузки для выбранного кабеля. При этом начальное значение нагрузки должно находиться в пределах от 0 до 100 Кгс, а шаг измерений должен составлять от 10 до 30 Кгс.

При необходимости параметры и график обнуляются нажатием кнопки «Сброс».

5.2 Исследование зависимости коэффициента PMD от радиуса изгиба кабеля.

Выбрать кабель DD-G Cable 24F (24 оптических волокон в кабеле) длиной 4 км для исследования, установив метку напротив него.

Провести измерение зависимости коэффициента PMD от радиуса изгиба кабеля. Первое значение радиуса изгиба ввести 120 мм. Для измерения ввести величину изгиба ($R_{изг}$, мм) в специальное поле, измерить значение PMD нажатием на кнопку «Измерить». Внести данные в отчёт.

Произвести измерения для пяти значений радиуса изгиба с шагом от 5 до 20 мм. Построить график. Нажать кнопку «Построить график» и сравнить его с полученным.

Обнулить все значения нажатием на кнопку «Сброс».

Выбрать кабель DD-G Cable 24F (24 оптических волокон в кабеле) длиной

3,8 км для исследования, установив метку напротив него.

Произвести повторное измерение для тех же значений.

5.3 Исследование зависимости коэффициента PMD от сдавливающей нагрузки.

Выбрать кабель DD-G Cable 30F (30 оптических волокон в кабеле) для исследования, установив метку напротив него.

Провести измерение зависимости коэффициента PMD от сдавливающей нагрузки. Для измерения ввести значение сдавливающей нагрузки ($F_{сдав,}$ Н) в специальное поле, измерить значение PMD нажатием на кнопку «Измерить». Внести данные в отчёт.

Измерения должны производиться в диапазоне 500÷2500 Н. Произвести измерение минимум для пяти значений. Шаг выбирается самостоятельно, должен составлять от 100 до 500 Н. Построить график. Нажать кнопку «Построить график» и сравнить его с полученным.

Обнулить все значения нажатием на кнопку «Сброс».

Выбрать кабель DD-G Cable 24F (24 оптических волокон в кабеле) для исследования, установив метку напротив него.

Произвести повторное измерение для тех же значений.

5.4 Исследование зависимости коэффициента PMD при циклическом изменении температуры.

Для исследования используется кабель AS Cable 36F (36 оптических волокон в кабеле).

Ввести значение температуры равное 25 ^{0}C в специальное поле, нажать кнопку «Измерить». Результат измерения записать.

Затем производятся измерения при температуре -20 ^{0}C и 65 ^{0}C.

После этого цикл повторяется ещё два раза. При этом «Счётчик времени» отображает условную длительность эксперимента.

После последнего измерения построить график зависимости PMD от циклического изменения температуры со временем. Нажать кнопку «Построить график».

В результате выполнения данного пункта необходимо заполнить таблицу 1:

Таблица 1 – Зависимость коэффициента PMD при циклическом изменении температуры для кабеля AS Cable 36F.

Усреднённый коэффициент PMD линии, пс/км^(1/2)							
Температера (С) на каждом шаге	25	-20	65	-20	65	-20	65
Время эксперимента, час							

В результате отчёт должен содержать таблицы измеренных значений, графики зависимостей, выводы по проделанной работе.

6. Содержание отчета:

6.1 Отчет должен содержать: формулировку цели работы, программу к

лабораторной работы, основные расчетные формулы, результаты расчетов и моделирования, выводы по каждому пункту лабораторного задания на основании полученных расчета и моделирования.

6.2 В целом отчет по лабораторной работе должен быть оформлен каждым студентом индивидуально с соблюдением требований ГОСТ. В частности:

– на графиках отмечаются точки, по которым построены кривые;

– на осях графиков проставляются масштабы и размерности;

– результаты расчетов и измерений следует представлять в виде таблиц;

– графики и таблицы должны быть пронумерованы;

– в заголовках таблиц проставляются рассчитываемые величины и их размерности;

– результаты расчетов, не помещенные в таблицы, оформляют отдельно следующим образом: формулы, подставленные числовые значения, результаты вычислений с указанием размерностей;

– если на графике имеются несколько кривых, каждая из них должна быть снабжена соответствующими надписями;

6.3 Все графики необходимо выполнять на миллиметровой бумаге или обычной бумаге в клетку. Масштаб следует выбирать таким образом, чтобы координаты любой точки графика могли быть определены быстро и с удовлетворительной точностью.

6.4 Нанесение на графике точек, соответствующих расчетам или экспериментальным данным, должно быть выполнено аккуратно и отчетливо. Необходимо пользоваться общепринятыми условными обозначениями величин и сокращениями названий.

7. Контрольные вопросы:

7.1 В какой зависимости от ПМД находится полоса пропускания оптического волокна?

7.2 Что такое главные состояния поляризации PSP (Principal State of Polarization)?

7.3 В чем суть волокна с сильно выраженным двулучепреломлением или иначе волокна, поддерживающего состояние поляризации?

7.4 Какое явление называется связыванием мод?

7.5 Какой вклад в PMD вносит коннектор?

7.6 Как будет влиять один плохой участок волокна на значение PMD для всей линии связи?

7.7 Какой вклад в PMD вносит изолятор?

7.8 Какими методами пользуются для измерения PMD?

7.9Что измеряется в методе сферы Пуанкаре?

7.10 Для чего нужен оптический циркулятор в компенсаторах на основе волоконных решеток?

7.11 Чем отличается конструкция эталона Фабри – Перо от эталона Жире – Турнуа?

7.12 Почему нужна динамическая компенсация в случае поляризационной

модовой дисперсии?

7.13 Как в интерферометрическом методе получают значение PMD (DGD)?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

Исследование параметров xWDM систем при четырехволновом смешении

1 Цель работы:

1.1 Получить знания по нелинейным явлениям проявляемых в системах xWDM.

1.2 Получить навыки в расчетах компенсации хроматической дисперсии.

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г

3 Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер IBM PC.

3.2 Программное обеспечение «Исследование параметров xWDM систем при четырехволновом смешении».

4 Подготовка к работе:

4.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

4.2 Подготовить бланк отчета.

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Запустите программу «Исследование параметров xWDM систем при четырехволновом смешении».

5.2 Изучите теоретический материал по нелинейным явлениям в системах ВОСП xWDM: фазовая кросс-модуляция; вынужденное комбинационное рассеяние света; вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна; четырехволновое смешение.

5.3 Перейдите к лабораторному заданию №1. На экране монитора появится блок схема системы ВОСП xWDM, соберите схему сети, переместив

компоненты ВОСП на нужную позицию, как показано в примере рисунка 1. Перенос компонентов осуществляется указателем мыши, удерживая левую кнопку.

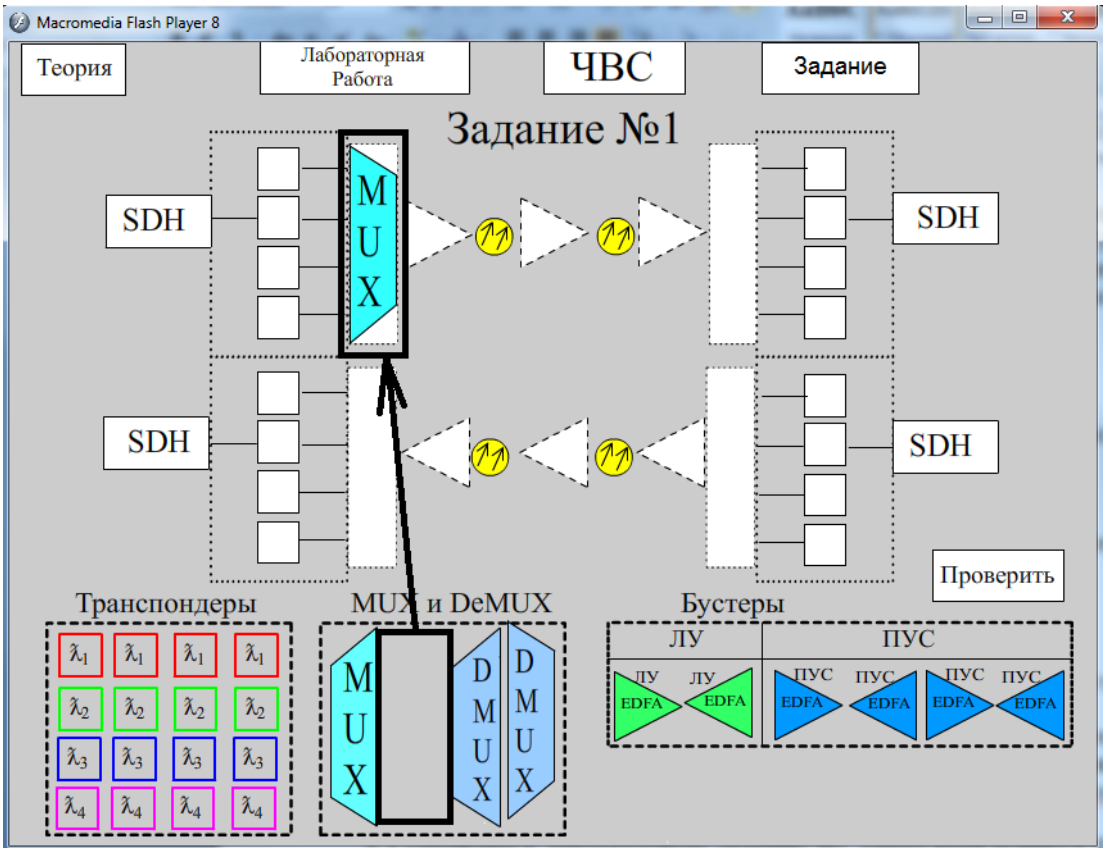


Рисунок 1 – Сбор структурной схемы системы ВОСП xWDM

После того как схема собрана, нажмите кнопку «Проверить», если результат будет положительным, структурную схему сети отобразить в отчете.

5.4. Построение графиков зависимости $P_{ош}(L)$ и $P_{ош}(N_{\lambda})$ от различных параметров системы xWDM.

5.4.1 Перейдите к выполнению задания №2. По исходным табличным данным (таблица 1) занесите числовые значения в «окна» данных.

Таблица 1 – Исходные данные к заданию №2

Вариант	Длина трассы	Количество оптических каналов
1	39	40
2	37	25
3	35	30
4	40	29
5	45	40
6	50	20
7	50	30
8	42	32

9	38	30

После того, как указаны численные значения длины трассы и числа оптических каналов, установите тип оптического волокна G.652, выберите скорость интерфейсного потока STM-1, технологию CWDM. Затем, нажмите кнопки «Рассчитать». Появятся результаты расчетов коэффициента ошибок $P_{ош}$ от длины трассы L и количества оптических каналов N_{λ}. По данным расчетам постройте график зависимости $P_{ош}(L)$ и $P_{ош}(N_{\lambda})$.

Измените скорость интерфейсного потока с STM-1 на STM-4, затем на STM-16 и STM-64. Постройте на одном графике зависимости $P_{ош}(L)$ и $P_{ош}(N_{\lambda})$ для всех уровней STM-N.

5.4.2 Проделайте пункт 5.4.1 для волокна рекомендации G653.

5.4.3 Проделайте пункт 5.4.1 для волокна рекомендации G655.

5.4.4 Проделайте пункт 5.4.1 для волокна рекомендации G652, G.653 и G.655 сменив систему ВОСП CWDM на DWDM.

5.5 Расчет места установки компенсатора дисперсии.

5.5.1 Перейдите к заданию №3. По исходным данным заполните «окна» данных.

Таблица 1 – Исходные данные к заданию №2

Вариант	L, км	STM-N	N_{λ}
1	390	1, 16	40
2	370	16, 64	25
3	350	1, 64	30
4	400	1, 256	29
5	450	4, 256	40
6	477	4, 64	20
7	420	16, 256	30
8	260	16, 256	32
9	210	4, 16	30

Выберите тип оптоволокна рекомендации G.652, первый тип потока STM-N, технологию DWDM, установите компенсатор дисперсии на линию трассы ВОЛС, после чего нажмите кнопку «Рассчитать». В окне коэффициента ошибок, программы выдаст результат расчетов. Передвигая компенсатор дисперсии влево или вправо, добейтесь минимального значения хроматической дисперсии (результат расчета представлен в окне под мультиплексором) и минимального коэффициента ошибок. Если длина трассы достаточна длинная, то для компенсации дисперсии на протяженных участках понадобится дополнительные компенсаторы дисперсии, для этого, щелкните по кнопке «Добавить компенсатор» (рисунок 2).

Зарисуйте структурную схему сети, указав место установки компенсаторов дисперсии в километрах, записать значения коэффициента ошибки.

5.5.2 Повторить пункт 5.5.1 для второго интерфейсного потока STM-N.

5.5.3 Повторите пункты 5.5.1 и 5.5.2 для оптических волокон рекомендации G.653 и G. 655.

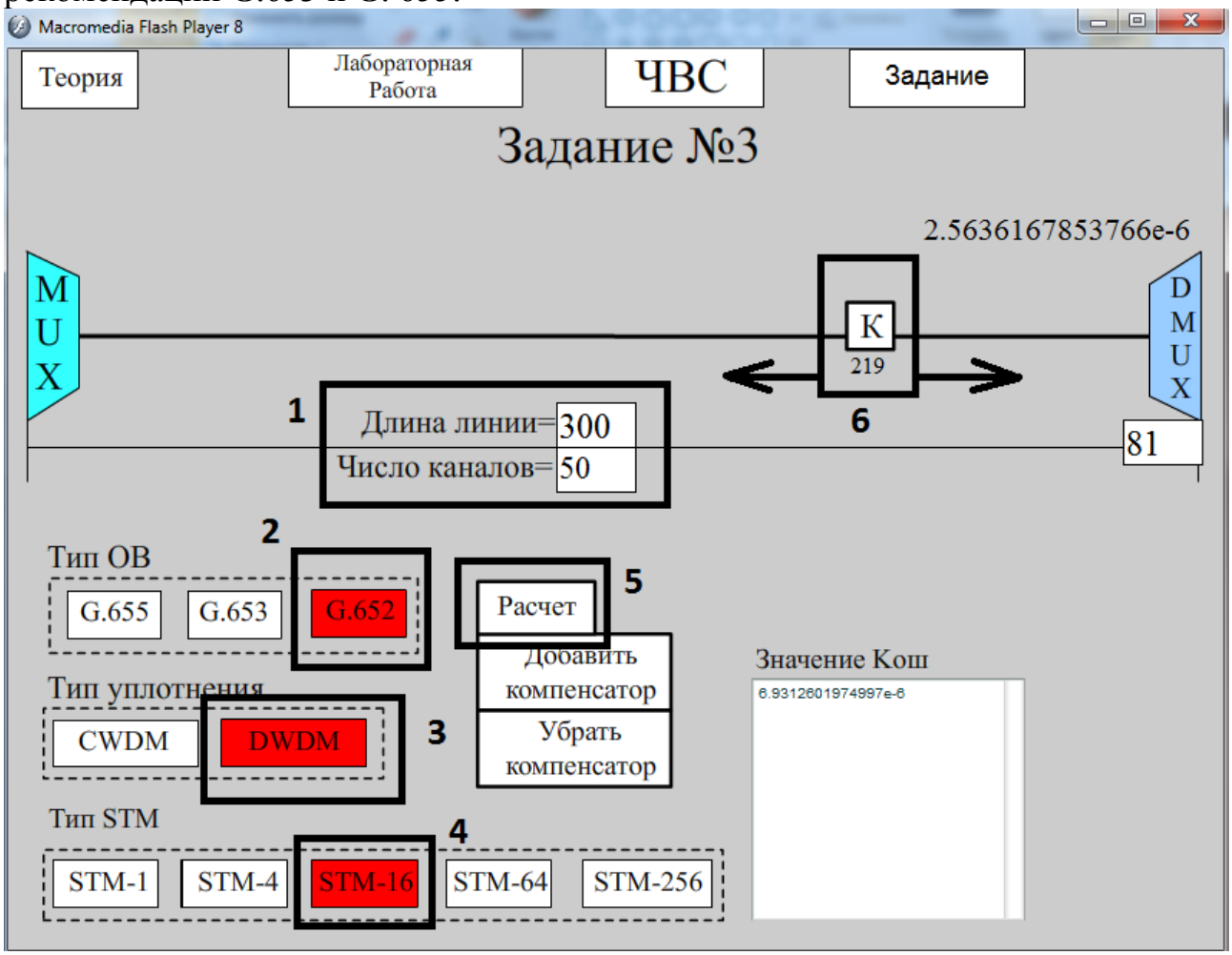


Рисунок 2 – Расчет места установки компенсатора дисперсии

6. Содержание отчета:

6.1 Цель работы.

6.2 Структурная схема задания №1

6.3 Графики зависимости $P_{ош}(L)$ и $P_{ош}(N_{\lambda})$ для волокон рекомендации G.652, G.653 и G.655 при различных интерфейсных потоков STM-N.

6.4 Структурные схемы сети задания №3.

6.5 Вывода по каждому заданию.

6.6 Ответы на контрольные вопросы.

7. Контрольные вопросы:

7.1Какова природа происхождения четырехволнового смешения в системах ВОСП xWDM?

7.2 В каких системах xWDM проявляется больше всего четырехворлновое смешение и почему?

7.3 Назовите способы борьбы с четырехволновым смешением в системах xWDM?

7.4 В каких системах xWDM при наличии четырехворлнового смешения коэффициент ошибок будет максимальным и почему?

7.5 Почему, при использовании оптоволокна рекомендации G.653 в истемах xWDM коэффициент ошибок всегда равен 100%?

7.6 Что такое дисперсия и к чему она приводит?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

Перспективные методы модуляции ВОСП

1. Цель работы:

1.1 Изучение новых форматов модуляции в ВОСП и параметров модулированных оптических сигналов.

1.2 Изучение принципов формирования модулированных оптических сигналов..

2 Список литературы:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г.

2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

3. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

4. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляров. - Изд. 2-е, стереотип.- СПб.: Лань, 2010 г.

3. Основное оборудование:

3.1 Персональный компьютер с установленной операционной системой Windows 7 (SP1), Windows 8 или Windows 10.

3.2 ПО – электронная лабораторная работа.

4 Подготовка к работе:

3.1 Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе по конспекту лекций и литературе.

3.2 Подготовить бланк отчета.

5 Порядок выполнения работы:

5.1 Задание №1. Выполните формирование оптического сигнала формата NRZ-OOK модулятором Маха-Зендера с одним управляющим каналом. Постройте график сигнала NRZ-OOK, полученный на выходе модулятора. Постройте график переходной характеристики модулятора Маха-Зендера.

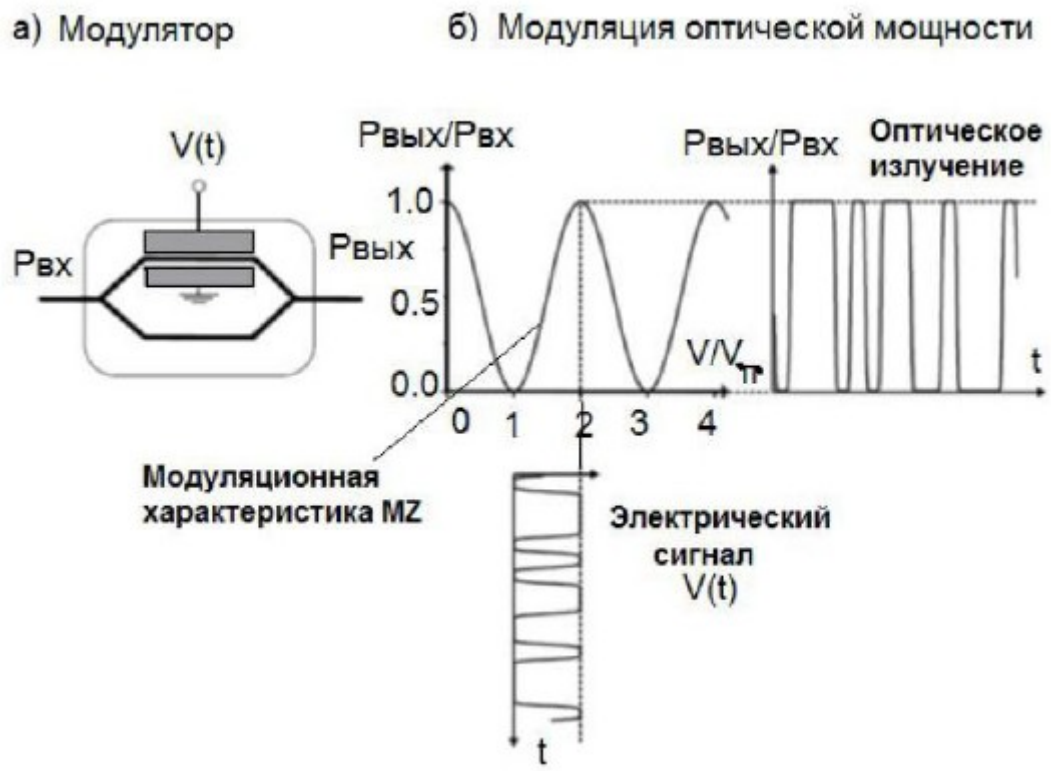


Рисунок 1 Модулятор Маха-Зендера с одним управляющим каналом

5.2 Задание №2. Выполните формирование оптического сигнала формата RZ-OOK модулятором Маха-Зендера с одним управляющим каналом. Постройте график сигнала RZ-OOK, полученный на выходе модулятора. Постройте график переходной характеристики обоих модуляторов Маха-Зендера.

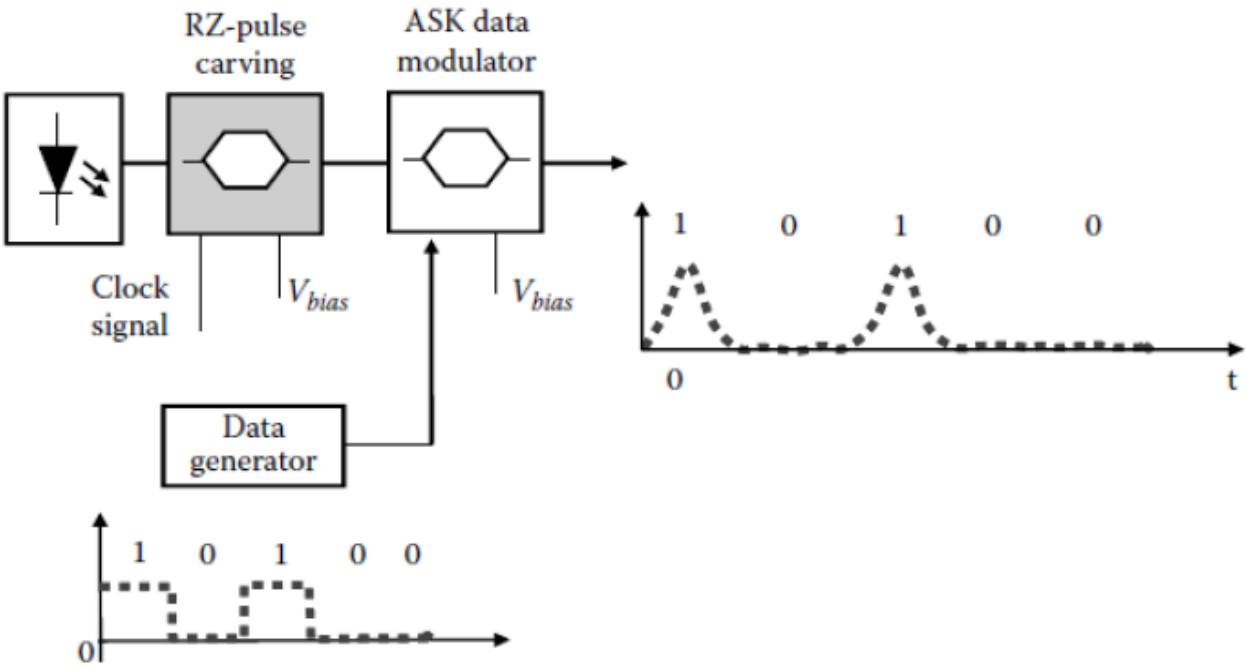


Рисунок 2 Структура оптического передатчика RZ-OOK с использованием двух MZM

На рисунке 2 приведена структура передатчика RZ- OOK, в котором используется два внешних MZM. Оптический передатчик OOK как правило состоит из лазерного источника, служащего для генерации световых волн, с длиной удовлетворяющей стандарту Международного союза электросвязи (International Telecommunication Union, ITU). Первый MZM выполняет роль формирователя периодических импульсов в соответствии с формой RZ кода.

5.3 Задание 3 Выполните формирование оптического сигнала формата RZ33-ASK и CSRZ модулятором Маха-Зендера с одним управляющим каналом. Примечание. Различные типы RZ-импульсов могут генерироваться в зависимости от амплитуды напряжения высокочастотного колебания и схем смещения MZM. Уравнения, определяющие сигналы электрического поля импульсов RZ, можно определить по формуле:

$$E(t)=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{E_b}{T}}\sin\left[\dfrac{\pi}{2}\cos\left(\dfrac{\pi t}{T}\right)\right] & 67\%\ duty-ratio\ RZ\ pulses\ or\ CSRZ\\ \sqrt{\dfrac{E_b}{T}}\sin\left[\dfrac{\pi}{2}\left(1+\sin\left(\dfrac{\pi t}{T}\right)\right)\right] & 33\%\ duty-ratio\ RZ\ pulses\ or\ RZ33\end{cases}$$

где $E(t)$ – напряженность электрического поля сигнала;

E_b – энергия импульса;

T – период следования импульсов.

RZ импульс с относительной длительностью 33% от периода обозначается как импульс RZ33, в то время как RZ импульс с коэффициентом заполнения 67% известен как тип CSRZ. Отличие в генерировании этих двух типов импульсов RZ заключается выборе напряжения смещения для рабочей точки на передаточной характеристике MZM. Рисунок 3 поясняет процесс формирования импульсов RZ33 и CSRZ.

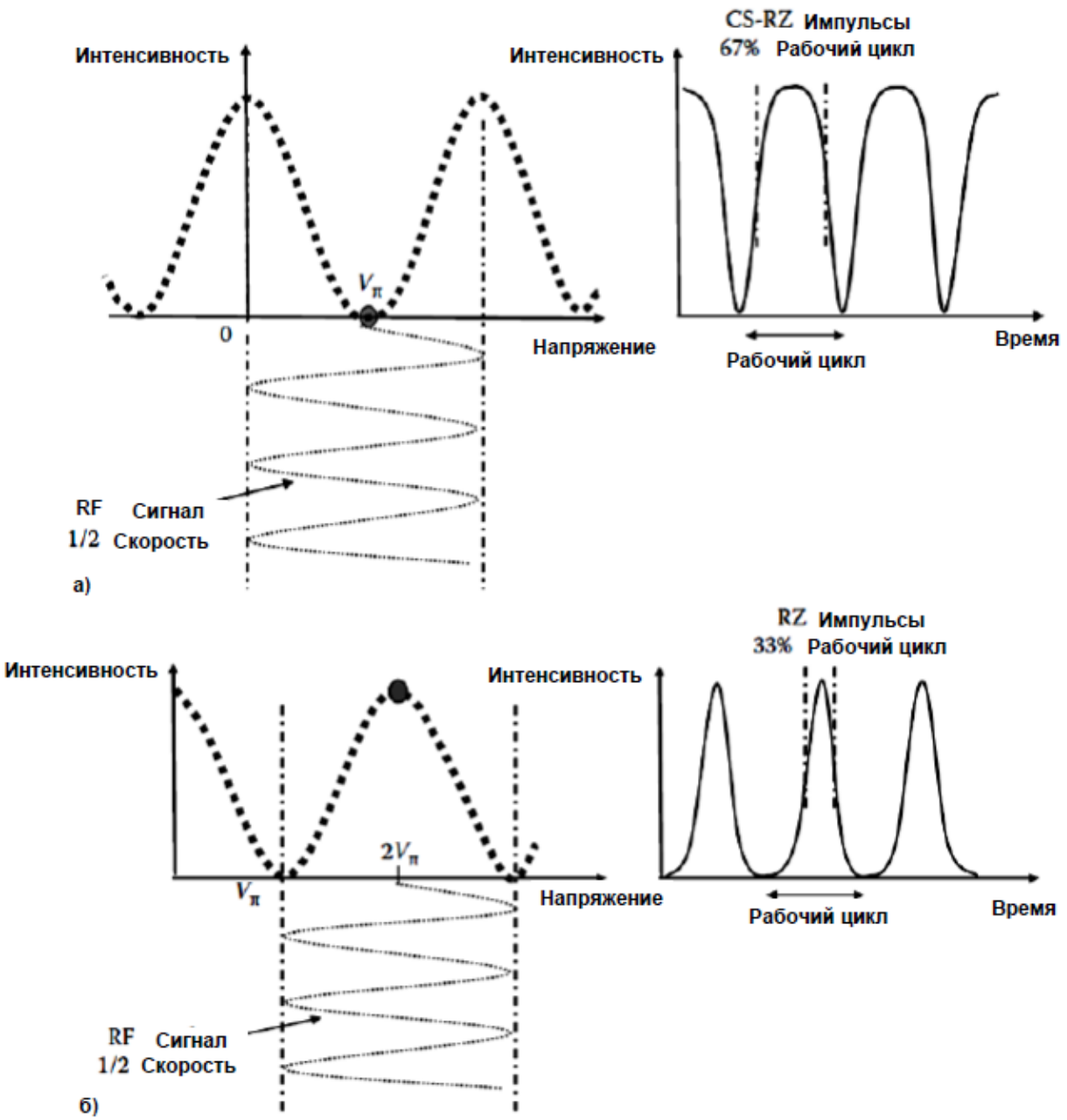


Рисунок 3 – Точки смещения и ВЧ сигналы для генерации импульсов:
а) CSRZ б) 33% RZ

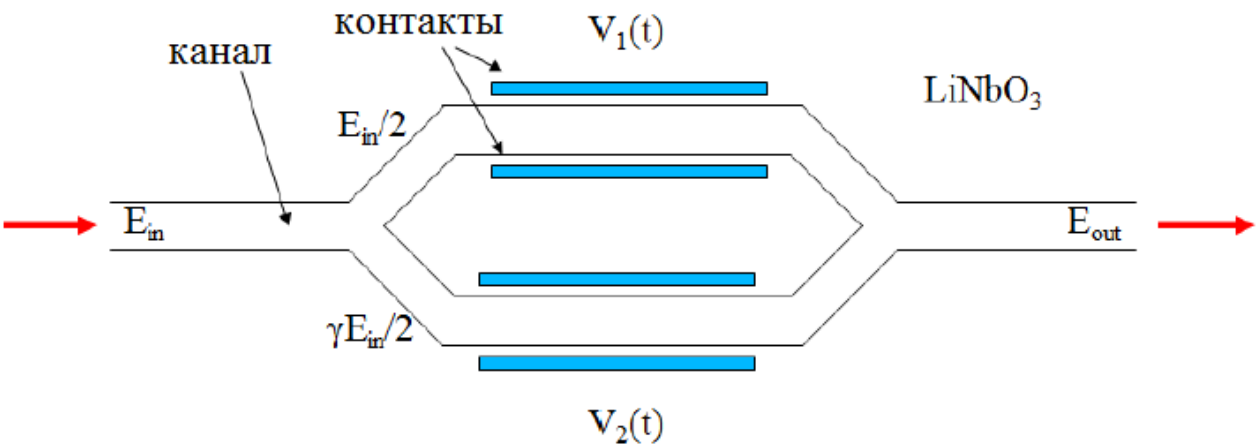
Для формирования RZ импульсов может также использовать модулятор Маха-Цендера с двумя управляющими волноводами, на которые подается управляющий сигнал синусоидальной формы. Смещение рабочей точки находится в пределах от $-V\pi/2$ до $+V\pi/2$ с амплитудой $V\pi/2$. Таким образом, между состояниями логической последовательности импульсов «1» и «0» создается фазовый сдвиг на величину π,получаем RZ импульсы с чередующимися значениями фазы 0 и π. Если требуется подавление несущей, то на два волновода модулятора подается управляющий сигнал с амплитудой $V\pi$.

2 Модулятор MZ с двумя управляющими каналами

Сигнал на выходе MZM описывается выражением

$$E_0 = \frac{E_i}{2}\left[e^{j\varphi 1(t)} + e^{j\varphi 2(t)}\right] = \frac{E_i}{2}\left[e^{j\pi v_2(t)/V_\pi} + e^{j\pi v_2(t)/V_\pi}\right]$$

Процесс модуляции импульсов RZ осуществляется с помощью MZM с двумя управляемыми волноводами с управляющими информационными сигналами *V1(t)* и *V2(t) = – V1(t)* в каждом плече волновода MZM, соответственно.



Рисfунок 4 – Конструкция модулятора MZ

Сигнал на выходе MZ можно записать формулой

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2}\left[e^{j\phi_1(t)} + \gamma e^{j\phi_2(t)}\right] = \frac{E_{in}}{2}\left[e^{j\pi v_1(t)/V_\pi} + \gamma e^{j\pi v_2(t)/V_\pi}\right]$$

Функция передачи

$$\Psi(v_1(t), v_2(t)) = \frac{E_{out}(t)}{E_{in}} = \frac{1}{2}\left[e^{j\pi v_1(t)/V_\pi} + \gamma e^{j\pi v_2(t)/V_\pi}\right]$$

При γ =1 функция передачи равна

$$\Psi(v_1(t), v_2(t)) = \cos\left(\frac{\pi}{2V_\pi}(v_1(t) - v_2(t))\right)\left[e^{j\pi(v_1(t)+v_2(t))/2V_\pi}\right]$$

5.4 Задание 4. Выполните формирование оптического сигнала формата CSRZ модулятором Маха-Зендера с двумя управляющими каналами.

Процедура формирования импульсов CSRZ и значения параметра V_{bias}, показаны на рисунке 4а. Фазовая диаграмма сигнала приведена на рисунке 4б.

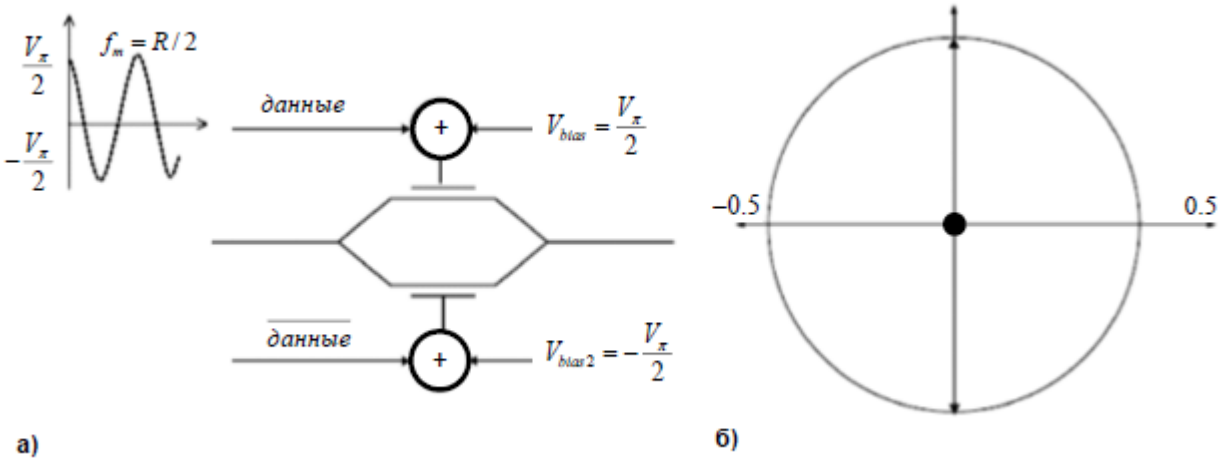


Рисунок 5 – Генерация импульсов CSRZ
а) Схема модулятора б) Векторная диаграмма сигнала

Ширина RZ импульсов обычно измеряется в точках, соответствующих половине максимального значения (FWHM, Full-Width-Half-Mark).

6 Содержание отчета:

6.1 Цель работы.
6.2 Схемы формирования модулированных сигналов.
6.3 Результаты выполненных заданий
6.4 Выводы по проделанной работе.
6.5 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы:

7.1. Что такое спектральная эффективность оптического сигнала?

7.2. Какие проблемы проявляются в системах передачи при увеличении скорости передачи данных в оптических каналах с фиксированным межканальным интервалом?

7.3. В чем преимущества фазовой модуляции nPSK в оптических каналах?

7.4. Объяснить, как формируются сигналы в форматах BPSK и DPSK?

7.5. Чем отличаются спектры сигналов DPSK с различными формами импульсов (NRZ, RZ, CSRZ)?

7.6. Чем отличаются оптические сигналы в форматах RZ и CSRZ?

7.7. Что обозначают аббревиатуры ASK и PSK?

7.8. Чем ограничено использование прямой модуляции оптического излучения в каналах со скоростями от 10 Гбит/с до 1 Тбит/с?

7.9. Сколько ступеней преобразования оптического сигнала в формирователе CSRZ?

7.10. Объяснить, как формируются оптические сигналы формата DB?

7.11. Чем отличаются спектры сигналов в форматах модуляции NRZ, RZ, CSRZ, DB?

7.12. Какие форматы оптических импульсов можно формировать модулятором MZ?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Линейные коды ВОСП

Существует несколько линейных кодов, среди них:

- NRZ без возврата к нулю (биполярный) (Non Return to Zero,). Как вы видите на рисунке 1, этот код представляет собой просто отмасштабированную и сдвинутую по уровню копию оригинального цифрового сигнала.

- Bi_0-L (бифазный код) – также известный, как Манчестерский код. Как видно на рисунке 1, при этом методе кодирования уровни напряжения изменяются с отрицательного на положительный в середине периода при передаче 1 и с положительного на отрицательного при передаче всех бит.

- RZ-AMI (с возвратом к нулю) – метод кодирования с маркером инверсии. Как видно из рисунка 1, при передаче 0 используется нулевое напряжение, а при передаче 1 – импульс длительностью в половину бита. Полярность импульса изменяется после каждой единицы.

NRZ-M (без возврата к нулю) – с маркером (биполярный). Этот код изменяет уровень напряжения при передаче каждой новой логической 1 и не изменяет уровень при передаче любого логического 0.

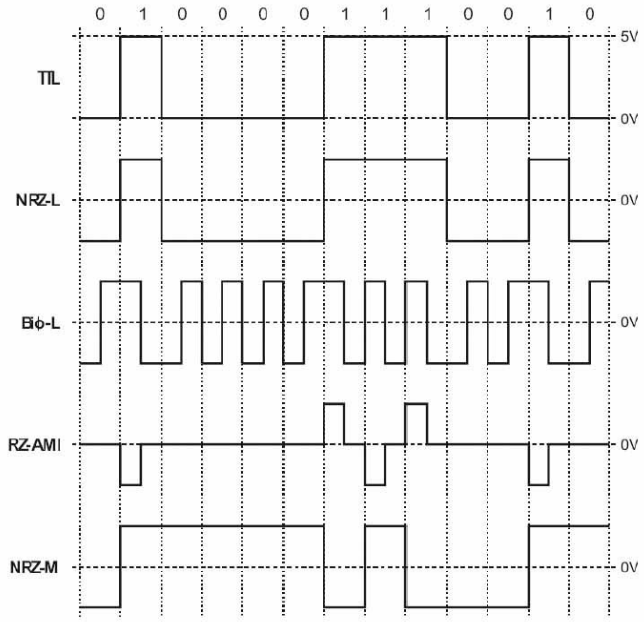


Рисунок 1 – Временные диаграммы

В таблице 1 представлены сравнительные требования по ширине полосе пропускания при передаче этих сигналов по линиям связи. Также показана пригодность разных методов кодирования для восстановления сигнала битовой синхронизации.

Таблица 1 - Полоса пропускания линейных кодов.

Методы кодирования	Минимальная полоса пропускания	Восстановление сигнала битовой синхронизации
NRZ-L	f/2	Плохо
Bi_0-L	f	Очень хорошо
RZ-AMI	f/2	Хорошо
NRZ-M	f/2	Плохо

Как видите, кодирование RZ-AMI является наилучшим компромиссом между шириной полосы пропускания и восстановлением сигнала битовой синхронизации среди этих четырех методов (другие характеристики линейных кодов здесь рассматривать не будем).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Оптические разветвители

Как вам известно, чтобы электрически соединить два неизолированных медных проводника требуется их контакт лишь в одной точке. Это позволяет легко разделить и направить в два или более разных места электрические сигналы, передаваемые по проводнику. Однако разделение световых сигналов, передаваемых по оптоволокну, далеко не так просто. Оптоволокно разработано так, чтобы передаваемый на другой конец свет находился в сердцевине проводника (с использованием полного внутреннего отражения). То есть очень малое количество света, вошедшего в проводник, может теряться вдоль его длины. Ясно, что световой сигнал нельзя разделить, просто соединив оптические проводники в какой-то точке, как медные проводники.

В одном из методов оптического разделения используется явление имеющих место на практике потерь небольшого количества световой энергии в тонком стекловолокне при распространении света по длине оптоволокна. Таким образом, становится возможным передать часть света из одного световода в другой, поместив достаточно длинные отрезки стекловолокна достаточно близко. Вариантом этой идеи является увеличение близости между оптическими проводниками (а, следовательно, уменьшение длины, вдоль которой осуществляется связь между волокнами) путем сваривания сердцевин оптоволокна. Оптическое устройство, предназначенное для разделения света подобных образом, называется разветвителем со сваренными сердцевинами (fused-fiber coupler), и Emona FOTEx содержит два подобных модуля.

Конструкция разветвителя со сваренными сердцевинами схематично показана на рисунке 1.

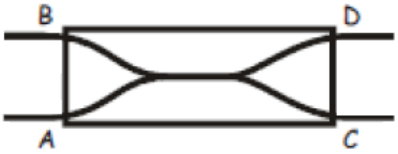


Рисунок 1 – Структурная схема разветвителя

Это устройство содержит четыре порта (то есть входа-выхода), которые обозначаются буквами алфавита от A до D. Порты A и D – концы одного из световодов, поэтому световой сигнал, поданный на один порт, должен появляться на другом. Другими словами, свет из порта A появляется в порту D, и наоборот. Аналогично, порты B и C – концы другого световода, потому световой сигнал, поданный в один из них, появляется в другом (то есть, из B в C и из C в B).

Сварка сердцевин световодов позволяет свету легко передаваться между ними в одной точке разветвителя. Таким образом, получаются дополнительные пути сигналов: от A к C, от C к A, от B к D, от D к B.

Важно отметить, что большая часть света проходит по световоду непосредственно (от A к D), чем косвенно (от A к C). Это значит, на выходах будет наблюдаться различие в интенсивности светового сигнала (на выходах с непосредственной связью с источником свет будет ярче). Поэтому прямые сигнальные пути называются сильными маршрутами (путями), а косвенные - слабыми. Это показано в таблице 1.

Таблица 1 – Пути прохождения сигнала между портами разветвителя

«Сильные пути»	«Слабые пути»
от A к D	от A к C
от D к A	от C к A
от B к C	от B к D
от C к B	от D к B

Интересно, что существует еще четыре нежелательных маршрута, возникающих из-за отражения и рассеивания света в местах контактирования волоконных проводников: от A к B, от B к A, от D к C, от C к D. Интенсивность света на выходах этих маршрутов очень мала, но они все равно могут вызывать проблемы, требующие решения, в зависимости от того, для каких целей используются разветвители.

И, наконец, разветвитель может использоваться не только для разделения, но и для объединения сигналов. Например, пусть сигнал поступает на порт A. Из предыдущего обсуждения нам известно, что сигнал появится на порте D (сильный) и порте C (слабый). Если в то же время подать другой сигнал на порт B, он также появится на порте D (слабый) и порте C (сильный). Ясно, что оба выходных порта теперь содержат объединенную световую информацию с обоих источников. Это очень полезное свойство будет использовано в следующих экспериментах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

1 Основы построения CWDM систем

В 2002 году МСЭ выпустил два новых стандарта, регламентирующих несущие частоты для систем DWDM и CWDM: рекомендацию ITU-T G.694.1, определяющую сетку частот для DWDM, и рекомендацию ITU-T G.694.2, определяющую распределение длин волн для CWDM. Согласно рекомендации ITU-T G.694.2 в системах CWDM кроме широко известных диапазонов C, S, L используются еще два диапазона O (original - основной) 1260 – 1360 нм и E (extensive - расширенный) 1360 – 1460 нм. В совокупности все диапазоны охватывают область от 1260 до 1625 нм, в которой располагается 18 каналов с шагом 20 нм (25 нм). На рисунке 2.1 дано графическое представление распределения длин волн по соответствующим диапазонам.

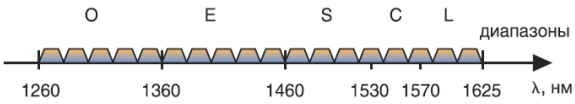
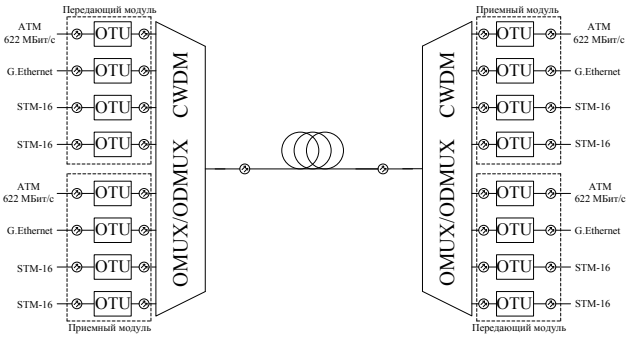


Рисунок 1 - Распределение длин волн по диапазонам согласно рекомендации G. 694.2

В ноябре 2003 года МСЭ утвердил новую рекомендацию ITU-T G.695 , которая определяет такие характеристики систем CWDM, как допустимое затухание сигнала, допустимые уровни мощности, покрываемое расстояние. В новом стандарте регламентируется скорость передачи 1,25 Гбит/с (ITU-T G.694.2 регламентировал только скорость 2,5 Гбит/с), что позволяет упростить и унифицировать внедрение и использование преобразователей Gigabit Ethernet в мультиплексорах CWDM.

На рисунке 2 приведена схема топологии «точка-точка» системы CWDM, при организации четырех оптических каналов в обоих направлениях.



OTU - транспондер

Рисунок 2 – Схема топологии «точка-точка» системы CWDM

2 Компоненты CWDM систем

2.1 Передающие модули.

В силу того, что протяженность городских и региональных сетей обычно находится в пределах 50–80 км, в CWDM-системах нет необходимости в использовании дорогих мощных лазеров с высокостабильным узким спектром генерируемого излучения. Лазеры с распределенной обратной связью (DFB, Distributed Feedback), в случае использования в CWDM-системах, не требуют термической стабилизации, громоздких и сложных схем управления, являются малогабаритными, экономичными и имеют малую стоимость (рисунок 3). Типичный DFB-лазер имеет температурную стабильность в пределах 0,08–0,12 нм/^{0}С, что дает изменение генерируемой длины волны в пределах 6–8 нм в диапазоне температур 0–70^{0}С. Данный показатель не приемлем для систем DWDM с шагом между несущими не более 0,8 нм, но для систем CWDM является вполне допустимым. Мощность генерируемого излучения порядка 1 мВт, ширина полосы около 0,2 нм.

Излучаемой мощности достаточно для передачи на расстояние 50–70 км с уровнем BER 10^{-15}. Мощность, потребляемая передающим модулем с таким лазером, не превышает 1 Вт на канал (для сравнения, передатчики в системах DWDM потребляют не менее 10 Вт на канал).

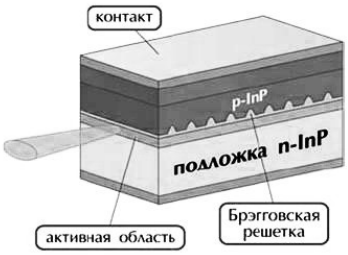


Рисунок 3 – Лазер с распределенной обратной связью (DFB)

В CWDM-системах могут применяться лазеры с вертикальными резонаторами (VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser).

2.2 Оптические мультиплексоры (OMUX) и демультиплексоры (ODMUX).

Основой любого мультиплексора/демультиплексора является дисперсионный элемент, способный разделить сигналы различных длин волн. В CWDM-системах для разделения оптических несущих применяются, как правило, относительно недорогие устройства на основе тонкопленочных фильтров (TFF, Thin Film Filter).

Потери, вносимые такими устройствами, составляют около 1 дБ на канал (в реальных системах получены величины в пределах 2,5 дБ для 8-канального устройства). Тонкопленочная технология характеризуется высокой развязкой (изоляцией) соседних каналов – порядка 30 дБ, высокой температурной стабильностью – 0,002 нм/°С, что эквивалентно изменению рабочей длины

волны на 0,07 нм при изменении температуры на 35°С. Для выделения длин волн с разносом 20 нм требуются фильтры с существенно меньшим числом диэлектрических слоев, чем в случае DWDM-фильтров (примерно 50 и 150 слоев соответственно), это сокращает производственный цикл, уменьшает расход материалов и снижает брак. В результате стоимость производства оптических селективных элементов снижается в 2 – 3 раза по сравнению со стоимостью производства тех же элементов для DWDM-устройств.

2.3 Волоконные световоды

Полоса пропускания оптического волокна определяется из его модуляционной характеристики – зависимость мощности излучения P на выходе ОВ от частоты модулирующего сигнала F (рисунок 4).

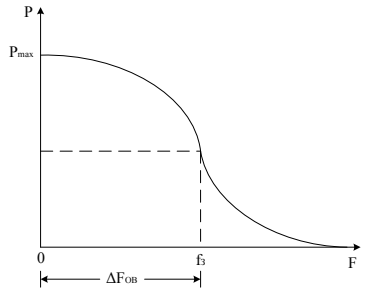


Рисунок 4 – Модуляционная характеристика ОВ

Из рисунка 4 видно, что полоса пропускания волокна ΔF_{OB} определяется на уровне $0{,}5P_{max}$, которому соответствует предельная полоса частоты пропускания f_3. Если оптический импульс на выходе ОВ имеет форму кривой Гаусса, то справедливо следующее соотношение (формула 1):

$$\Delta F_{ов} \times L = \frac{0{,}187}{|D_{XP}| \times \sigma_{Л}} = \frac{0{,}44}{|D_{XP}| \times \Delta\lambda_{0,5}}$$

(1)

$$D_{XP} = \frac{\pi \times C}{8 \times B^2 \times L \times \lambda^2}, \qquad (2)$$

где D_{XP} (пс/нм*км) – удельная хроматическая дисперсия;

$\Delta\lambda_{0,5}$ (нм) – ширина спектральной линии лазера на уровне половины его входной мощности;

$\sigma_{Л}$ (нм) – среднеквадратическая ширина спектральной линии лазера;

L (км) – длина связи;

B – скорость передачи.

Типичная зависимость затухания от длины волны для кварцевых волокон, легированных германием, представлена на рисунке 5.

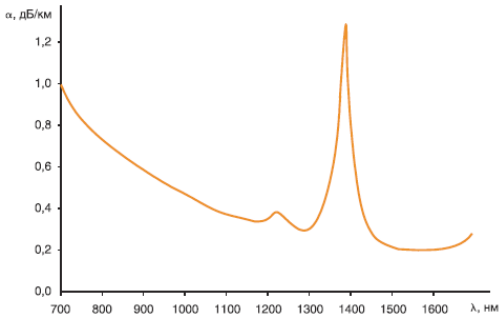


Рисунок 5 – Зависимость затухания от длины волны

Как видно из рисунка 5, существенное ограничение на число каналов в системах WDM накладывает присутствие пика поглощения на длине волны 1383 нм, обусловленного наличием в волокне гидроксильной группы OH. В системах CWDM, согласно рекомендации G.694.2, использовались 8 длин волн в диапазоне 1470–1610 нм. В силу более высокого затухания область длин волн 1260–1360 нм не использовалась. Увеличить число каналов до 18 позволили так называемые волокна с нулевым водяным пиком (ZWPF, Zero Water Peak Fiber; LWPF, Low Water Peak Fiber), параметры которых определяет рекомендация ITU-T G.652.

В волокнах данного типа устранен пик поглощения на длине волны 1383 нм и величина затухания на этой длине волны составляет порядка 0,31 дБ/км, что вполне приемлемо для систем CWDM. На рисунке 8 показано распределение длин волн согласно рекомендации ITU-T G.694.2 и кривая затухания для волокна с нулевым водяным пиком.

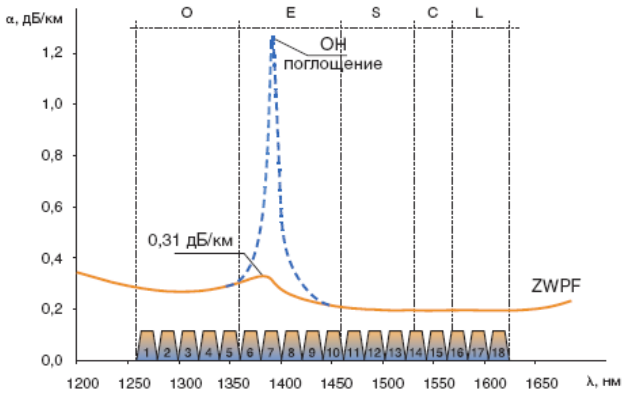


Рисунок 8 - Распределение длин волн по диапазонам согласно рекомендации ITU - T G.694.2 и кривая затухания волокна типа ZWPF

В основном в выпускаемых системах предлагается не 18, а 16 рабочих длин волн, это обусловлено увеличением затухания в диапазоне волн менее 1310 нм за счет увеличения коэффициента релеевского рассеяния. При скорости передачи одного оптического канала 2,5 Гбит/с по 16 каналам можно

обеспечить 40 Гбит/с (16×2,5 Гбит/с). Системы, использующие весь спектр длин волн в диапазоне 1270 – 1610 нм, принято называть Full-spectrum CWDM (FS-CWDM).

Известно, что скорость передачи зависит от формы импульса и типа импульсной последовательности. Обычно предполагают, что импульсная последовательность – это случайный набор следующих друг за другом нулей и единиц. Для такого случайного процесса скорость передачи B и среднеквадратическая длительность импульса $\sigma_и$ связаны соотношением (формула 3):

$$B \le \frac{1}{4\sigma_И} \qquad (3)$$

Для многоугольных импульсов связь между оптической полосой пропускания $\Delta F_{ОВ}$ и скоростью передачи находятся из соотношения (формула 4):

$$B = 1{,}01 \times \Delta F_{ОВ}$$

(4)

Для Гауссова импульса имеет место соотношение (формула 5):

$$B = 1{,}34 \times \Delta F_{ОВ}$$

(5)

2.4 Транспондеры (OTU).

Для передачи по одному волокну нескольких сигналов STM необходимо преобразовать их из “формата” SDH в “формат” CWDM. Эту функцию выполняет транспондер, представленный на рисунке 9, а на рисунке 10 изображены формы восстановления электрического сигнала.

На его вход подается сигнал STM (или ATM, IP), который необходимо преобразовать в “формат” CWDM, т.е. в сигнал со строго фиксированной длиной волны и узким спектром излучения.

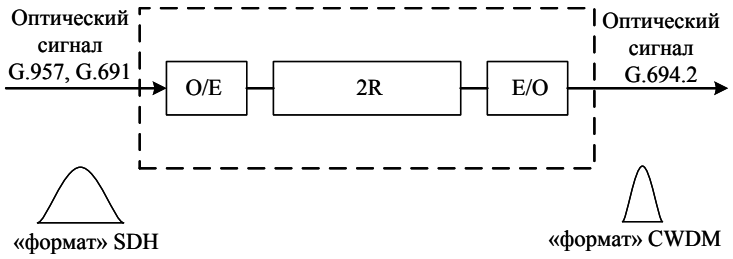


Рисунок 9 – Схема транспондера

Оптический STM-сигнал преобразуется в электрическую форму, восстанавливается форма сигнала, и далее выполняется обратное электрооптическое преобразование в «формат» CWDM. Для восстановления формы сигналов используется 3R-преобразование: 1R (re-amplification) - усиление сигнала, 2R - 1R плюс восстановление формы сигналов (reshaping), 3R - 2R плюс ресинхронизация (re-timing). Для передачи сигнала на сравнительно небольшие расстояния, в пределах города или области, достаточно использовать транспондеры с функцией 2R.

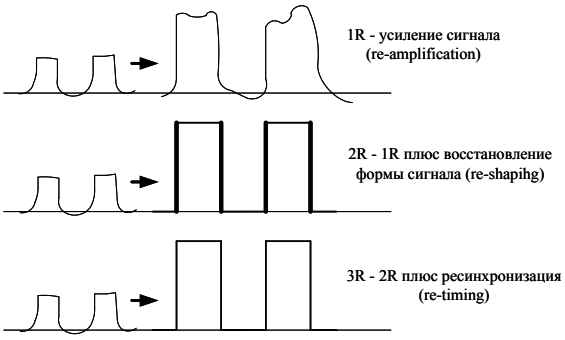


Рисунок 10 – Форма восстановления сигнала

Сами транспондеры и элементы пассивной оптики убраны внутрь корпуса, и получить к ним доступ с целью каких-либо манипуляций нет возможности, да и просто не имеет смысла. Практически, все, что доступно пользователю, это установка или замена модулей SFP (Small Form-factor Pluggable), если оборудование укомплектовано соответствующими разъемами. А вот с модульными решениями все гораздо интересней. Здесь есть свобода действий. Например, платы мультиплексора и демультиплексора могу вообще не устанавливаться в полку, так как это пассивная оптика. Система управления и контроля всего-навсего фиксирует наличие этих плат в конкретном слоте полки и не производит над ними никаких действий. А если по каким-то причинам вы решите отказаться от применения платы управления и платы резервирования, то вообще можете заполнить всю полку одними транспондерами и собирать окрашенные каналы на отдельно стоящем оборудовании. Сами транспондеры могут быть оснащены слотами для SFP-модулей, и тогда вам придется применять оптические шнуры с разъемами LC. А могут иметь на лицевой панели, жестко закрепленные разъемы SC или реже FC. А самое главное, в транспондерах не применяет защиту по коду вендора. Это значит, что можно устанавливать в слот SFP-модуль любого производителя.

2.5 Оптические усилители

Рамановское усиление в системах CWDM. В технологии CWDM используются более широкий диапазон длин волн и менее дорогие компоненты, чем в DWDM. Из-за малого расстояния между каналами в системах DWDM необходимо применять термоэлектрические охладители для стабилизации лазерного излучения. Более широкий частотный интервал между каналами

CWDM позволяет использовать в качестве источников излучения более дешевые лазерные диоды с прямой модуляцией (DML – Directly Modulated Lasers), не требующие охлаждения. Однако из-за ограниченной выходной мощности неохлаждаемых лазеров бюджет мощности CWDM-систем обычно не превышает 30 дБ. Мощность сигнала падает не только вследствие затухания в волокне, но также из-за потерь на мультиплексорах, демультиплексорах и оптических мультиплексорах ввода-вывода, поэтому стандартное расстояние передачи в CWDM-линиях составляет 40 – 80 км. Кроме того, в некоторых случаях затухание в волокне оказывается выше, чем ожидалось, что приводит к уменьшению расстояния передачи или превышению максимального бюджета мощности. Поэтому в CWDM-линиях могут потребоваться оптические усилители. На рисунке 11 показаны полосы усиления различных усилителей, которые можно использовать для CWDM-линий передачи.

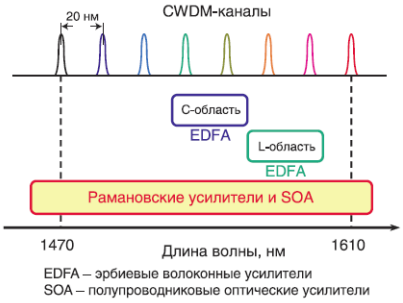


Рисунок 11 - Полоса усиления оптических усилителей для CWDM – систем

Эрбиевые волоконные усилители (EDFA) хорошо зарекомендовали себя в оптических линиях связи, хотя их полоса усиления недостаточно широка. Полупроводниковые оптические усилители (SOA – Semiconductor Optical Amplifiers) усиливают в более широкой области спектра, но обладают серьезным техническим недостатком – неприемлемой величиной перекрестных помех между каналами. В то же время рамановские усилители при широкой полосе усиления обладают малыми перекрестными помехами.

Дискретные рамановские усилители (рисунок 12). Эффективность дискретного рамановского усилителя (LRA – Lumped Raman Amplifier) при использовании в CWDM-системах зависит от того, насколько равномерно усиление разных каналов, что в свою очередь определяется выбором каналов, расстоянием между ними и спектром накачки.

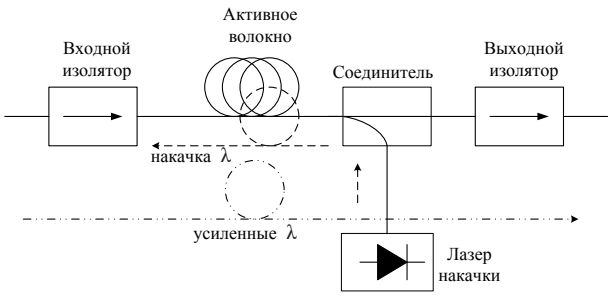


Рисунок 12 – Схема дискретного рамановского усилителя

При использовании лазеров накачки на двух длинах волн разница усиления каналов по сравнению с усилением центрального канала может быть меньше 1,5 дБ. Для получения эффективного рамановского усиления с помощью обычных лазеров в нераспределенных рамановских усилителях применяются волокна с высокой нелинейностью (HNLF – highly nonlinear fibers), обладающие в два раза большим, чем у обычного волокна, коэффициентом рамановского рассеяния (ВКР – вынужденного комбинационного рассеяния). Сравнение характеристик усилителей, которые можно использовать в качестве усилителей мощности (бустеров) в системах CWDM, приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение характеристик усилителей для систем CWDM

Параметры	Эрбиевый	Полупроводниковый	LRA
Ширина полосы усиления, нм	1530 – 1590	1470 – 1610	1470 – 1610
Мощность насыщения, дБм	> 20	~ 13	>18
Полный коэффициент усиления, дБ	>15	>10	>10
Шум – фактор, дБ	< 6	< 8	< 6,5
Поляризационная чувствительность, дБ	0,3	0,5	0,3

2.6 Оптические интерфейсы.

Эталонные точки для многоканального соединения (MPI-SM и MPI-RM) и одноканального соединения (SS и RS) определяются следующим образом:

S_S - является одноканальной эталонной точкой на компонентном входе сетевого элемента CWDM;

R_S - является одноканальной эталонной точкой на компонентном выходе сетевого элемента CWDM;

MPI-S_M - является многоканальной эталонной точкой на агрегатном выходе сетевого элемента CWDM;

MPI-R_M - является многоканальной эталонной точкой на агрегатном входе сетевого элемента CWDM;

RP_S – является эталонной точкой звена на агрегатном выходе сетевого элемента CWDM;

RP_R – является эталонной точкой на агрегатном входе сетевого элемента CWDM.

Литература

Оновная литература:

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. – УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911

2. Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011 г. , 368 с. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389

Дополнительная литература

1. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009. – 272 с.: ил. – (Серия «Библиотека инженера»). Электронное издание. - УМО. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=335483

2. Портнов Э. Л. Оптические кабели связи их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов. - М. : Горячая линия-Телеком, 2012 г.

3. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. Режим доступа: http://ibooks.ru/reading.php?productid=27917