

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные сети и системы»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

к.т.н., профессор Байкенов А.С.

(ученая степень, звание, ФИО)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: «Исследование систем WDM-PON следующего поколения»

Магистрант: Куанышбаев Б. Г.

(Ф.И.О.)



(подпись)

группа МРЭТн 17-2

Руководитель: к.т.н., PhD

(ученая степень, звание)



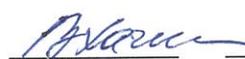
(подпись)

Данько Е.Т.

(Ф.И.О.)

Рецензент к.ф.-м.н., доцент

(ученая степень, звание)



(подпись)

Латышев В.С.

(Ф.И.О.)

Консультант по ВТ к.т.н., ст.препод

(ученая степень, звание)



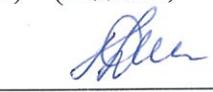
(подпись)

Данько Е.Т.

(Ф.И.О.)

Нормоконтроль: ст. пр-м

(ученая степень, звание)



(подпись)

Демидова?

(Ф.И.О.)

Алматы 2019

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Институт Космической Инженерии и Телекоммуникаций  
Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные сети и системы»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Куанышбаев Б.Ф.

(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Исследование систем WDM-PON следующего поколения»  
утверждена Ученым советом университета № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_

Срок сдачи законченной диссертации «\_\_\_» \_\_\_\_\_

Цель исследования состоит в исследовании возможности использования WDM технологии в пассивных оптических системах, теоретический анализ, модельная реализация WDM-Long Reach-PON в среде Optisystem, расчет показателей качества передачи данных в оптических системах.

Выделение определенной длины волны для каждого пользователя с высокой скоростью на нисходящем потоке и обеспечить дальность связи для отдаленных сельских районов Казахстана

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Основное понятие о технологии WDM и пассивной оптической сети PON  
Возможность использования WDM на сети доступа

2. Модельная реализация WDM-Long Reach-PON с помощью программного обеспечения Optisystem

3. Расчет показателей качества передачи данных в оптических системах

4. Расчет затухания, отношения сигнал/шум, показателя битовых ошибок для построенной линии связи в программной среде Optisystem

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рис 5 – Схема WDM-PON с использованием сплиттера 1x4 в Optisystem

Рис 5.1 – Характеристика глаз-диаграммы битовых ошибок при L=25 km

Рис 5.4 – Спектр анализ на входе в линию

Рисунок 5.4 – Оптический анализ спектра для схемы с использованием сплиттера 1x4 при L=25 км

Рекомендуемая основная литература

1. Оптические мультиплексоры и демультимплексоры систем WDM / Н.Слепов// Электроника: Наука, Технология, Бизнес.-2004. №8.2.

2. Шувалов В.П., Фокин В.Г. Оптические сети доступа радиуса действия. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018.-188с

3. Вандич А.П., Ефимов В.В, Никульский И.Е, Степуленок О.А. Прикладные аспекты применения сетевых технологий WDM-PON // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5, №1, стр 34-43

5. Hyuk-Choon Known , Young-Yuk Won, Dae-Won Lee, Sang-Kook Han. WDM passive Optical Network with simultaneous Wireline/Wireless Downlink Transmission and Wavelength Reuse for Uplink Connection// Transparent Optical Networks . 2007, 1CTON 07. 9<sup>th</sup> International Conference on page 9-11

Г Р А Ф И К

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Информационный обзор выбранной теме	05.01.2018	
2. Основные направления развития и постановка задачи и целей для данной работы (теоретическая часть)	12.10.2018	
3. Исследование возможности построения схемы с использованием WDM технологии на оптических сетях на базе программного обеспечения Optisystem	5.02.2019	
4. Расчет затухания, OSNR для оптической линии, получение показателей характеристики функционирования линии	10.03.2019	
5. Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных	12.04.2019	

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Байкенов А.С.)  
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Данько Е.Т.)  
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Куанышбаев Б.Ф.)  
(Ф.И.О.)

## **Аңдатпа**

Талшықты-оптикалық байланыс, байланыстың басқа түрлері арасында көшбасшы орын алады. Бір абонентке толқын ұзындығы бойынша толқынды бөлуді пайдалана отырып, төмен ағындағы өткізу қабілетін арттыру – магистрлік жұмыстың басты мақсаттарының бірі.

Уақыт өте келе абоненттердің телекоммуникациялық желі қуатына қажеттілігі айтарлықтай арта бастады. Осыған байланысты магистрлік диссертацияның тақырыбы бір абонентке 1 Гбит/с дейін өткізу қабілетін арттыру және қашықтағы ауылдық аумақтар үшін 50 км дейін байланыс қашықтығын арттыру мүмкіндігін зерттеуге арналған.

## **Аннотация**

Волоконно-оптическая связь занимает лидирующее положение среди других видов связи. Перспективной является технология спектрального уплотнения каналов, где спектральные каналы находятся на расстоянии  $\Delta\lambda$  друг от друга по шкале длин волн. Целью является увеличить пропускную способность на одного абонента на нисходящем потоке используя волновое разделение по длине волны.

В связи с этим тема магистерской диссертации, посвященной изучению возможности увеличения пропускной способности на одного абонента до 1 Гбит/с и увеличения дальности связи для удаленных сельских территорий до 50 км.

## **Abstract**

Fiber-optic communication occupies a leading position among other types of communication. Promising is the technology of spectral compaction of channels, where the spectral channels are at a distance  $\Delta\lambda$  from each other on the wavelength scale. The goal is to increase the bandwidth per subscriber on the downstream using wavelength division.

In this regard, the theme of the master's thesis devoted to the study of the possibility of increasing the capacity per subscriber to 1 GB / s and increasing the range of communication for remote rural areas up to 50 km.

## Содержание

Введение	6
1 Факторы ухудшающие соотношение сигнал/шум в оптическом волокне и их анализ	8
1.1 Затухание	8
1.2 Хроматическая дисперсия	11
1.3 Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)	15
1.4 Четырехволновое смешение	18
1.5 Фазовая кросс-модуляция	19
2 Модельная реализация линии WDM-PON в программной среде Optisystem	21
2.1 Принципы организации дуплексных каналов в сетях WDM-PON	21
2.2 Схемы построения линии по технологии WDM-PON	25
2.3 Экспериментальное исследование в программной среде Optisystem	31
3 Оценочный расчет для физического уровня WDM-PON	52
3.1 Расчет дисперсионных и энергетических характеристик	52
Заключение	56
Список использованной литературы	58

## Введение

Волоконно-оптическая связь занимает лидирующие позиции среди других видов связи. Интенсивное развитие Интернета, а также появление новых услуг связи способствует быстрому росту потоков данных, передаваемых по сети, и поставило перед операторами связи новую задачу поиска путей для увеличения пропускной способности как транспортных сетей, так и для сетей доступа.

По ходу времени потребности абонентов в емкости телекоммуникационной сети значительно растут. Пытаясь удовлетворить эти потребности, операторы связи при выборе решения учитывают разнообразие потребностей абонентов, потенциал развития сети, а также экономическую целесообразность и выгоду. Таким образом, сеть PON, основанная на древовидной архитектуре волоконно-оптического кабеля с пассивными оптическими разветвителями в узлах, оказалась наиболее экономичной и способной обеспечить широкополосную передачу различных приложений. Архитектура PON обладает необходимой эффективностью для увеличения сетевых узлов и пропускной способности в зависимости от потребностей пользователей.

На сегодня одним из основных вариантов PON является технология Gigabit PON. GPON предоставляет операторам эффективное решение для высокоскоростной сети доступа («последняя миля»), обеспечивает значительную экономию оптических волокон, а также обеспечивает высокую надежность благодаря своим пассивным элементам.

Существующие и появляющиеся широкополосные сети xPON стандартизированы и должны предоставлять абонентам скорости до 10 Гбит/с в нисходящей линии связи и  $\sim 2,5$  Гбит/с в восходящем направлении. Нисходящее (DS - нисходящее) направление берется из стационарного оборудования (OLT - терминал оптической линии) в абонентское устройство (ONT - терминал оптической сети), а восходящее (US - Upstream) - из ONT в OLT.

Гарантированная скорость широкополосного обслуживания, предоставляемого пользователю, считается одним из важных критериев привлечения клиентов. В связи с растущим спросом на услуги мультисервисного широкополосного доступа для абонентов возникает необходимость дальнейшего увеличения пропускной способности существующей сети при минимально возможных затратах. Становится очевидным, что сеть GPON не сможет полностью удовлетворить потребности потребителей в будущем. Однако, разделив каждого подписчика на длину волны, вы можете значительно увеличить пропускную способность оптических сетей.

Перспективной считается технология спектрального уплотнения (WDM) мультиплексирование с разделением по длине волны каналов, спектральные каналы которых расположены на расстоянии  $\Delta\lambda$  друг от друга в масштабе

длины волны. Эквивалентный частотный интервал между каналами  $\Delta f$  регулируется стандартом ITU-T G.694.1 и может составлять 100, 50, 25, 12,5 ГГц [9]. Такие сети пассивного доступа называются WDM-PON.

WDM-PON (пассивная оптическая сеть с мультиплексированием с разделением по длине волны) - пассивная оптическая сеть с разделением спектральных каналов подразумевает назначение каждой длины волны каждому абоненту. Существует два варианта построения сети WDM-PON:

- с назначением двух длин волн для каждого абонента (одна для приема и одна для передачи);

- если вы назначаете подписчику только одну длину волны (в этом случае вы можете удвоить количество подписчиков, работающих в такой сети).

Используя технологию можно добиться увеличения пропускной способности до 1 Гбит/с на каждого абонента. Сеть WDM-PON имеет следующие особенности:

- влияние изменения длины линии на среднее время задержки пакета не увеличивается с увеличением количества абонентов, включенных в сегмент WDM-PON, поскольку нет разделения по времени доступа;

- наименьшее влияние интервала изменения интервала обслуживания на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) в обратном канале достигается с помощью технологии WDM-PON из-за отсутствия длительного процесса доступа и небольшого объема интервал обслуживания.

Среди преимуществ WDM-PON можем отметить, что пользователю предоставляется выделенная полоса (нет распределения на конкурсной основе), и с увеличением количества абонентов затухание в мультиплексоре WDM увеличивается в меньшей степени, чем в оптическом разветвителе. Кроме того, абонентские сигналы физически изолированы, а оптоволокно используется эффективно (до 64 абонентов на волокно, как в GPON).

Пожалуй, основным недостатком WDM-PON является высокая стоимость, поскольку требуются узкополосные передатчики, излучающие на данной длине волны. Это особенно важно для абонентских устройств ONT, так как их стоимость напрямую влияет на стоимость абонентской линии. С одной стороны, эта проблема частично решается путем унификации и сокращения типов аппаратных компонентов в конечных устройствах (например, с помощью лазеров, настроенных на эту волну), с другой стороны, есть основания надеяться, что со временем стоимость оптические компоненты для WDM-PON будут намного ниже текущего уровня.

Переход от технологии TDM-PON к WDM-PON является как одним из ключей к успешной будущей сети оптического доступа.

# 1 Факторы ухудшающие соотношение сигнал/шум в оптическом волокне и их анализ

## 1.1 Затухание

Когда оптический сигнал распространяется в волокне, он экспоненциально ослабляется из-за потери мощности, и обеспечивается линейный и нелинейный механизм взаимодействия световых волн / частиц со средним волокном. Если  $P_0$  - мощность, вводимая в волокно, длина  $L$  - передаваемая мощность.

$$P_L = P_0 \exp(-\alpha_z L), \quad (2.1)$$

где  $P_0$  – мощность, вводимая в волокно;

$L$  – длина волокна;

$\alpha_{из}$  – постоянная затухания волокна.

Используя эту формулу, можно получить выражения для оценки общих и удельных километрических потерь соответственно

$$\alpha_{общ} = 10 \lg \left( \frac{P_L}{P_0} \right) = 4,343 \alpha_{из} L, \text{ [дБ]} \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \left( \frac{P_L}{P_0} \right) = 4,343 \alpha_{из}, \text{ [дБ]} \quad (2.3)$$

Удельные или пробеговые потери, определяемые по формуле (2.3) и имеющие размерность [дБ / км], часто называют коэффициентом ослабления ОФ.

Внимание в общем смысле обусловлено собственными потерями в  $\alpha_c$  агентах и дополнительными потерями, так называемым кабелем, условным скручиванием  $\alpha$ , а также деформацией и изгибом оптических волокон при нанесении покрытия и защитных оболочек при изготовлении оптического элемента. кабель:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k \quad (2.4)$$

Собственные потери волоконного световода состоят из потерь поглощения  $\alpha_n$  и потерь рассеяния  $\alpha_p$ :

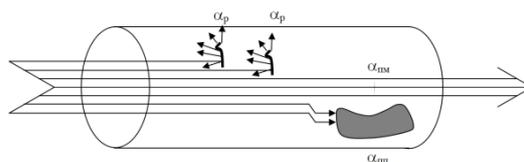
$$a = a + a_p. \quad (2.5)$$

Источники потерь, отнесенные к данной категории, являются постоянными для тех или иных типов волокон, они определяются совершенством технологии производства волокна, и, как показывает практика эксплуатации волоконно-оптических кабелей, километрическое затухание в ОВ не изменяется в течении длительных (предположительно 10 лет) сроков.

Потери, возникающие при распространении сигнала через оптическое волокно, связаны с тем, что часть мощности, подводимой к входу волокна, рассеивается из-за изменения направления распространения лучей на неровностях и их светимости в окружающее пространство ( $\alpha_p$ ), другая часть мощности поглощается как самими молекулами кварца ( $\alpha_{pm}$ ), так и посторонними примесями ( $\alpha_{pp}$ ), выделяющимися в виде джоулева тепла. Примеси могут представлять собой ионы металлов (никель, железо, кобальт и т. Д.) И гидроксильные группы (ОН), в результате чего возникают резонансные демпфирующие всплески. В результате общая потеря определяется выражением:

$$a = a_m + a_p + a_k. \quad (2.6)$$

Механизм основных потерь, возникающих при распространении по ОВ электромагнитной энергии, иллюстрируется на рисунке 2.1 [10].



$\alpha_p$  – рассеяние на нерегулярностях;

$\alpha_{pp}$  – поглощение из-за примесей;

$\alpha_{pm}$  – поглощение в материале волокна

Рисунок 2.1 – Механизмы основных потерь в световодах

Потери на поглощение состоят из собственного поглощения и поглощения из-за наличия в стекле ионов металлов переходной группы  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  и ионов гидроксильной группы ОН. Собственное поглощение проявляется при идеальной структуре материала. Механизм этих потерь связан с поведением диэлектрика в электрическом поле (диэлектрической поляризацией). В диапазоне рабочих частот ВОСП количественно они могут быть оценены по формуле [3]

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 tg \delta}{\lambda}, \frac{дБ}{км}, \quad (2.7)$$

Где  $n_1$  – показатель преломления сердцевины ОВ;

$tg \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь материала сердцевины ОВ, принимающий значения в диапазоне от  $10^{-12}$  до  $2 \cdot 10^{-11}$ ;

$\lambda$  –длина волны, км.

Как видно из формулы, эта составляющая поглощения линейно растет с частотой и существенно зависит от свойств материала оптического волокна ( $\text{tg}\delta$ ). Он характеризует нижний предел поглощения для данного диэлектрика и становится значительным в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. Когда длина волны излучения превышает 1,6 мкм, обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за увеличенных потерь, пропорциональных экспоненциальной функции, и уменьшается с увеличением частоты [3]:

$$\alpha_{\text{ик}} = c e^{-\frac{k}{\lambda}, \frac{\text{дБ}}{\text{км}}}, \quad (2.8)$$

где  $c$  и  $k$  – постоянные коэффициенты (для кварца  $k=(0,7\div 0,9)\cdot 10^{-6}$  м,  $c=0,9$ ).

Примесное поглощение для разных стекол, в зависимости от валентного состояния, изменяется. Так ионы металлов переходной группы, присутствующие в стекле, имеют электронные переходы в области длин волн (0,5÷1,0) мкм и вызывают соответствующие полосы поглощения. Пики поглощения за счет ионов металлов очень широкие.

Другой существенной примесью с точки зрения поглощения является вода, которая присутствует в форме ионов  $\text{OH}^-$ . На содержание  $\text{OH}^-$ -ионов в стекле влияет процесс его изготовления. Это соответствует ярко выраженному максимальному поглощению в области длины волны 1480 нм. Он всегда присутствует. Поэтому спектральная область вблизи этого пика практически не используется из-за больших потерь. Однако следует отметить, что уже в 1970 году изготовленное оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что присутствие примесей перестает быть доминирующим фактором ослабления в волокне. Так называемое рэлеевское рассеяние света препятствует дальнейшему уменьшению затухания.

Затухание из-за рассеяния обусловлено несколькими механизмами. Во всех оптически прозрачных веществах свет рассеивается в результате колебаний показателя преломления, возникающих в результате тепловых колебаний в жидкой фазе и «застывших» во время затвердевания. Он возвращается к четвертой степени длины волны и характерен для неоднородностей, размеры которых меньше длины волны, а расстояние между ними достаточно велико, чтобы исключить явления взаимодействия.

В дополнение к колебаниям плотности, колебания в концентрациях оксида также существенны. Оксиды, добавляемые в стекло, обычно увеличивают показатель преломления, и поэтому неоднородность концентрации создает большие колебания.

Причиной рассеяния также может быть неоднородность сегрегации материала. В результате недостаточного перемешивания и выдерживания при требуемой температуре во время процесса плавления стекла могут возникнуть области фазового разделения компонентов. Эта причина в принципе может быть устранена с помощью высококачественного процесса приготовления, в то время как влияние тепловых колебаний не может быть устранено.

Суммарные потери на Рэлеевское рассеяние зависят от длины волны по закону  $\lambda^{-4}$  и количественно могут быть оценены по формуле [3]

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4}, \frac{\text{дБ}}{\text{км}}, \quad (2.10)$$

где  $K_p$  – коэффициент рассеяния, для кварца – 0,8 [(мкм<sup>4</sup>. дБ)/км];

$\lambda$  – длина волны, мкм.

Рассеяние рассматриваемых видов не связано с нелинейными процессами. При достаточно больших мощностях могут происходить нелинейные процессы, в которых параметры материала изменяются в зависимости от величины мощности, распространяющейся в данном материале. В результате может появиться вынужденное комбинационное рассеяние, направленное на распространение электромагнитной энергии. Другой причиной нелинейного рассеяния может быть стимулированное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна. Это явление вызвано тем, что когда мощность превышает определенный порог, нелинейные процессы приводят к переходу мощности первичных волн в излучение других длин волн. Этот тип излучения в основном направлен назад.

Длина волны, на которой достигается нижний предел внутреннего затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями из-за рассеяния Рэлея и инфракрасного поглощения.

Микро изгибы могут существенно влиять на прирост  $\alpha_k$ . Значение потерь на одном микро изгибе может изменить значение в пределах (0,01ч0,1) дБ. Приращение затухания от микро изгибов  $\alpha'_z$  зависит от мелких локальных нарушений прямолинейности ОВ, характеризуемых смещением оси ОВ в поперечных направлениях на участке микроизгиба. Основными причинами появления микроизгибов являются локальные неосесимметричные механические силы различных типов, действующие на очень маленькие участки ОМ. Микроизгибы должны включать такие боковые деформации ОМ, для которых максимальный сдвиг оси ОФА сопоставим с диаметром сердцевины волокна. Особенности микроизгибов можно отличить тем, что их обычно много, расстояние между соседними микроизгибами существенно больше их размера. Общий вклад потерь из-за микроизгибов может быть значительным. Из-за микроизгиба угол раскрытия излучения, распространяющегося вдоль волокна, ограничен, и часть энергии излучается из оптического волокна. Поэтому при прокладке кабеля или патчкордов нужно тщательно проследить за тем чтобы не образовались микроизгибы.

## 1.2 Хроматическая дисперсия

Наряду с коэффициентом ослабления «наиболее важным параметром является дисперсия, которая определяет коэффициент пропускания для передачи информации.

Дисперсия - это рассеяние во времени спектральной или модальной составляющих оптического сигнала, что приводит к увеличению длительности импульса оптического излучения при его распространении на рис.2.4.



Рисунок 2.4 – Искажение формы импульсов вследствие дисперсии

Материальная дисперсия, или дисперсия материала, зависит (для прозрачного материала) от частоты  $\omega$  (или длины волны  $\lambda$ ) и материала ОВ, в качестве которого, как правило, используется кварцевое стекло. Дисперсия определяется электромагнитным взаимодействием волны со связанными электронами материала среды, которое носит, как правило, нелинейный (резонансный) характер и только вдали от резонансов может быть описано с приемлемой точностью, например, уравнением Sellmeier [6].

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_j \frac{R_j \omega^2}{\omega^2 - \omega_j^2} \quad (2.14)$$

где  $\omega_j$  – резонансные частоты,  $R_j$  – величина  $j$ -го резонанса, а суммирование по  $j$  для объемного кварцевого стекла ведется по первым трем резонансам.

Возникновение дисперсии в материале световода даже для одномодовых волокон обусловлено тем, что оптический источник, возбуждающий вход (светоизлучающий диод – СИД или лазерный диод - ЛД), формирует световые импульсы, имеющие непрерывный волновой спектр определенной ширины (например, для СИД это примерно 35-60 нм, для многомодовых ЛД (ММЛД) – 2-5 нм, для одномодовых ЛД (ОМЛД) – 0,01-0,02 нм). Различные спектральные компоненты импульса распространяются с разными скоростями и приходят в определенную точку (фазу формирования огибающей импульса) в разное время, приведя к уширению импульса на выходе и, при определенных условиях, к искажению его формы.

Показатель преломления зависит от длины волны. В этом случае уровень дисперсии зависит от диапазона длин волн света, вводимого в путь (как правило, источник излучает несколько длин волн), а также от центральной рабочей длины источника. В области 850 нм более длинные волны (более красные) движутся быстрее по сравнению с более длинными короткими (более глубокими) длинами волн. Волны с длиной 860 нм распространяются через стекло туннеля быстрее, чем волны с длиной 850 нм. В области 1550 нм ситуация меняется: более длинные волны движутся быстрее по сравнению с более длинными; Волна 1560 нм движется медленнее, чем волна 1540 нм (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Скорости распространения длин волн

Длина стрелок соответствует скорости длин волн, следовательно, более длинная стрелка соответствует более быстрому движению.

В некоторой точке спектра происходит совпадение, при этом более голубые и более красные длины волн движутся с одной и той же скоростью. Это совпадение скоростей происходит на длине волны примерно 1270 нм, называемой длиной волны с нулевой дисперсией, для объёмной среды, рисунок 2.6.

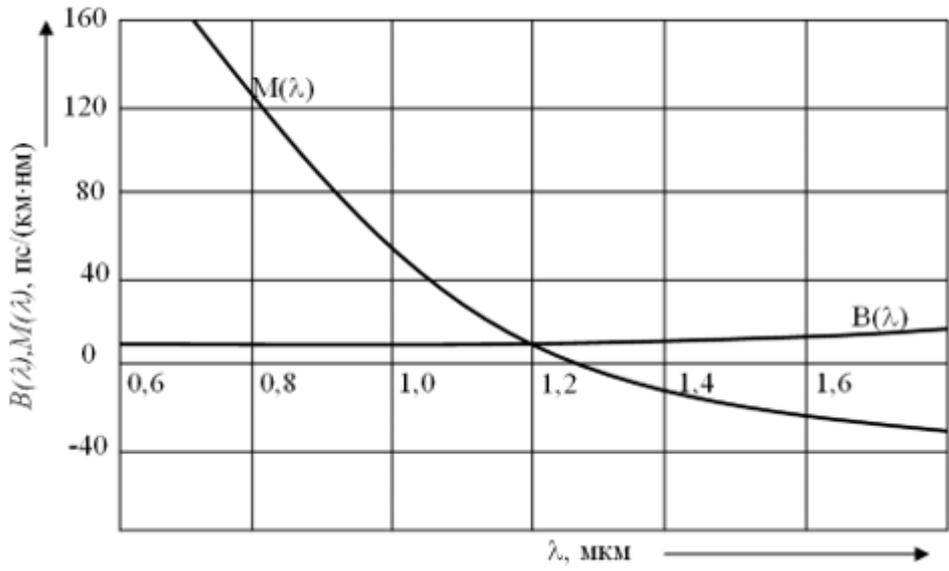


Рисунок 2.6 – Удельное значение дисперсии при различных длинах волн:  $B(\lambda)$  – волноводная,  $M(\lambda)$  – материальная

Для этого типа оптоволокна длина волны должна составлять 1312 нм, а также испускать испарение и излучение 1310 нм для излучения. Дисперсия волны для длины волны  $<1312$  нм и для длины волны  $>1312$  нм и вблизи 1312 нм будет равна нулю.

При инженерных расчетах для определения выражение [10]:

$$\tau_{\text{мат}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\lambda^2}{c_0} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} L, \quad (2.16)$$

Для определения  $\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$  можно воспользоваться формулой Селмейера для ПП кварцевого стекла с использованием метода конечных разностей, откуда вычисляют величины  $n(\lambda-\Delta\lambda)$ ,  $n(\lambda)$  и  $n(\lambda+\Delta\lambda)$ , после чего находят [4]:

$$n' \left( \lambda - \frac{\Delta\lambda}{2} \right) = \frac{n(\lambda) - n(\lambda - \Delta\lambda)}{\Delta\lambda}, \quad (2.17)$$

$$n' \left( \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2} \right) = \frac{n(\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}) - n(\lambda)}{\Delta\lambda}, \quad (2.18)$$

а затем

$$n''(\lambda) = \frac{n'(\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}) - n'(\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2})}{\Delta\lambda}, \quad (2.19)$$

Волноводная (внутримодовая) дисперсия обусловлена процессами внутри моды. Она характеризуется направляющими свойствами сердцевинны ОВ, а именно: зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения, что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия, в первую очередь, определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника  $\Delta\lambda$ , то есть

$$\tau_{gg} = \Delta\lambda LB(\lambda) \quad (2.20)$$

В естественных условиях рассматриваемые дисперсии компонентов могут иметь знак сжатия и различаться по характеру длины суспензии. В ряде случаев это позволяет оптимизировать показатель преломления за счет минимизации общей дисперсии на заданной длине волны благодаря взаимной компенсации материала и амплитуде дисперсии.

Обычное одномодовое волокно не обеспечивает минимум дисперсии для  $\lambda=1,55$  мкм, поэтому были разработаны ОВ со смещённой (Dispersion Shifted) или сглаженной (Dispersion Flattened) дисперсией, которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления. В результате исследования смещенной дисперсии полета удалось найти лучшие инструменты, которые обеспечивают инструменты с треугольным профилем, потому что они обладают свойствами самофокусировки и сохраняют распространение лучей и сохраняют силы, которые являются свойствами самофокусировки и сохраняют распространяющиеся лучи и сохраняют силы, которые являются самофокусирующимися, и продолжают распространять лучи, и сохраняют силы, которые являются свойствами самофокусировки, и сохраняют силы распространения и приложения войска, самофокусирующиеся, и сохраняют шаблоны распространения и сохраняют свойства самофокусировки. и продолжайте распространять силы в структуре.

Поскольку смещенные со смещением оптические волокна обеспечивают

минимальную дисперсию только на одной и той же длине волны, это затрудняет использование мультиплексирования для нескольких оптических носителей света. Поэтому, чтобы минимизировать дисперсию, все области прозрачности используются в сочетании со сглаженной дисперсией, которая также изготавливается с различными показателями преломления.

Профилирующая дисперсия проявляется в реальной оптике, которая может быть регулярной (например, с правильной, геликоидальной структурой), нерегулярной (например, нерегулярное изменение интерфейса PPP), нерегулярной (например, фактическое изменение интерфейса SPT) или нормальной (спиральная структура)

Конкретная профилированная дисперсия выражается в фс-секундах на километр длины света и спектральной ширине нанометра.

Сравнивая дисперсионные характеристики различных источников света, можно отметить, что лучшими с этой точки зрения являются отдельные цвета задней подсветки, где присутствует только хроматическая дисперсия, размер ядра не превышает нескольких пикосекунд времени и времени. значение определяется ( $\lambda=1,2...1,6$  мкм).

Наилучшие данные о дисперсии градиентных источников света с плавным параболическим изменением показателя преломления, при которых выравнивание времени распределения различных мод и определение дисперсии материала, получены из многоканального света. Дисперсия наиболее выражена в многоступенчатых светоизлучающих устройствах, что приводит к снижению их использования на цифровых высокоскоростных линиях связи. Результирующее значение уширения импульсов за счет модовой, материальной, в одноводной и профильной дисперсий определяется выражением

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}}) + \tau_{\text{пр}}]^2}, \quad (2.24)$$

### 1.3 Поляризационная модовая дисперсия (ПМД)

Поляризационно-модовая дисперсия (ПМД) является одним из факторов, ограничивающих увеличение скорости и дальности оптических телекоммуникационных систем.

Основной причиной развития ПМД является двулучепреломление оптического волокна. При этом визуально ПМД может быть представлено в следующем виде (рисунок 2.8).

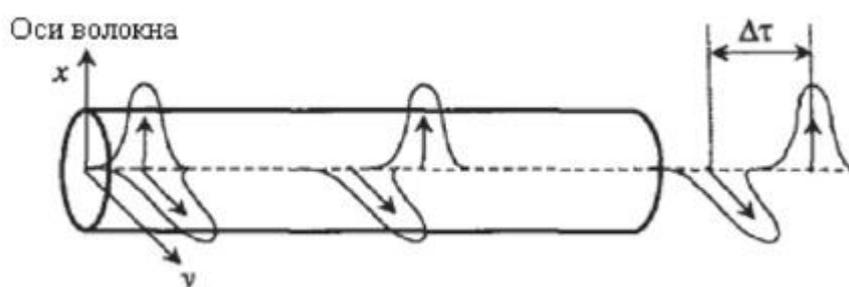


Рисунок 2.8 – Распространение света в волокне  
 $\Delta n = n_s - n_f$  - разница показателей преломления

Ортогональные моды имеют разные скорости распространения, и именно поэтому поляризация изменится, когда свет пройдет через волокно. Вы можете отслеживать различные виды изменений вектора поляризации, используя сферу Пуанкаре, как показано на рисунке 2.9. Сфера Пуанкаре представляет собой визуальное представление поляризации света, которая представлена точкой в сфере с тремя осями: вертикальная поляризация, 45-градусная поляризация и правильная круговая поляризация. Расположение точки в каждой из этих осей указывает направление поляризации.

Одной из основных характеристик ПМД является групповая дифференциальная задержка, которая суммируется в виде вектора ПМД в каждой локальной точке оптического волокна и может быть определена формулой

$$\frac{\partial \tau}{\partial L} = \beta + \beta \cdot \tau, \quad (2.26)$$

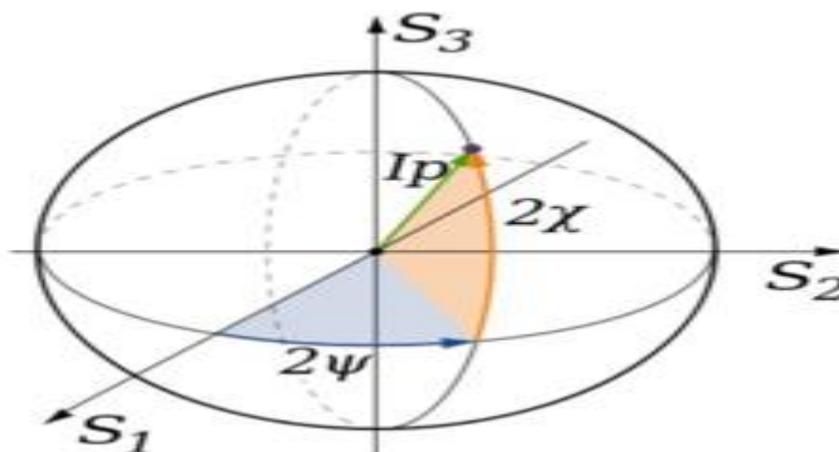


Рисунок 2.9 – Изображение поляризации параметров Стокса на сфере Пуанкаре

Разница между входным и выходным импульсами будет групповой задержкой. При построении протяженных оптических линий использование волокон с отрицательной дисперсией может уменьшить хроматическую дисперсию, в то время как этот метод нельзя использовать для компенсации PMD. Проблема заключается в том, что хроматическая дисперсия более или менее постоянна при разных температурах и временных интервалах. Для PMD это не присуще, так как этот эффект не характерен для идеального волокна. Следует отметить, что PMD является стохастической величиной. Высокое значение этой величины наблюдалось в оптических волокнах, работающих на HOLS с 1998 по 2000 год.

Согласно табл. 2.1 можно привести сводные значения поляризационно – модовой дисперсии на различных скоростях в зависимости от длины

оптического волокна. Для борьбы с ПМД высоких порядков используется цифровая компенсация на приемнике [20].

Таблица 2.1 – Суммарное значение ПМД на различных скоростях

Скорость передачи, Гбит/с	Ширина импульса, пс	ПМД, пс	L, км ( $PMD_C = 0,02$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$ )	L, км ( $PMD_C = 1$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$ )
2,5	400	40	$4 \cdot 10^6$	1600
10	100	10	$2,5 \cdot 10^5$	100
40	25	2,5	16000	6,25

Таблица также показывает для справки значения поляризационных потерь. Этот параметр показывает максимальную разницу в затухании сигнала для двух ортогональных состояний вектора поляризации. С развитием измерения плотного волнового мультиплексирования (DWDM) параметра потерь, зависящих от поляризации, также становится важным обеспечить требуемые характеристики и своевременно идентифицировать критические области и узлы PLOT.

С развитием высокоскоростных систем и переходом на системы 40, 100 и 400 Гбит / с возникает необходимость борьбы с накоплением поляризационной модовой дисперсии, которая образуется из-за неравенства скоростей распространения быстрой и медленной конверты в оптоволокно.

В когерентных оптических сетях, с учетом развития блоков цифровой обработки сигналов, используются цифровые компенсаторы хроматической и поляризационно-модовой дисперсии.

Анализ систем передачи, использующих оптическую амплитудную модуляцию, показывает, что формат NRZ имеет хорошее сопротивление PMD на скорости 40 Гбит / с по сравнению с RZ, а также формат фазовой модуляции DPSK [24].

Используя счетчик, который учитывает вектор поляризации, можно добиться компенсации дисперсии. Благодаря компенсации предел групповой задержки увеличен с 8 пс (без компенсации) до 28 пс (с использованием компенсатора PMD) [25].

Можно компенсировать накопленную дисперсию, используя дифракционную решетку Брэгга (DRB), где создаются условия для избирательного отражения определенных длин волн. Благодаря этому DRB работает как оптический фильтр, имеющий «стоп-полосу», локализованную в области длин волн Брэгга [27].

Прямая компенсация дисперсии возможна путем введения положительной дисперсии в OV, области OV с отрицательной дисперсией и, таким образом, чтобы полученная дисперсия с учетом использования WDM в определенном диапазоне длин волн была близка к нулю. Использование модификации кабеля TrueWave позволяет использовать системы WDM (DWDM) высокой плотности в стандартном диапазоне длин волн 1530–1565 нм без внешних компенсаторов. Для этих целей был разработан специальный тип OB - DCF - дисперсионно-компенсирующего волокна (VCD), который можно вставить как модуль в стойку определенной длины (помещенной в

картридж) как модуль в стойку с оборудованием.

Таблица 2.2 показывает экспериментальные зависимости, полученные между мощностью, вводимой в оптическое волокно, и эффективной площадью поперечного сечения оптического волокна. Нелинейные эффекты являются результатом увеличения уровня мощности сигнала с соответствующим увеличением плотности мощности в сердечнике волокна.

Таблица 2.2 - Соотношение мощности сигнала к эффективной площади сердцевинки волокна

Максимальная излучаемая мощность, дБм	Эффективная площадь сечения волокна $A_{эфф}, мкм^2$	Затухание в волокне, дБ
12	80	0,20
13	80	0,25
10	55	0,20

Нелинейные явления в оптических волокнах хорошо изучены, но при построении многоволновых систем передачи необходимо учитывать ряд механизмов формирования нелинейных продуктов в зависимости от формата и дисперсии оптического сигнала, в частности хроматической дисперсии и PMD, который является одним из перспективных направлений исследований [15].

#### 1.4 Четырехволновое смешение

Когда через волокно проходят два или более оптических сигнала с разными центральными частотами, сигнал смешивается, и в результате появляются новые компоненты сигнала. Это является причиной зависимости показателя преломления волокна от мощности сигнала, который вызывает распространение нелинейной среды, такой как эффект Керра (формула 2.28), и создание условий для смешивания сигнала.

Причины, по которым возможно возникает четырех волновое смешения в волокне:

- фазы DWDM сигналов должны быть одинаковыми, что выполняется только при низком значении хроматической дисперсии;
- ограниченность WDM промежутка между каналами;
- высокий уровень мощности сигнала в каналах.

Центральные частоты вновь создаваемых сигнальных компонентов могут быть вычислены сложением или вычитанием величины  $N_i$  всех центральных частот, формула 2.29, 2.30:

$$f_{IM} = N_1 f_1 + N_2 f_2 + N_3 f_3 \quad (2.29)$$

$$IM_{\text{порядок}} = \sum_{i=1}^M N_i \quad | \quad | \quad (2.30)$$

где  $f_{IM}$  – центральная частота новой компоненты сигнала, ТГц;

$f_i$  – центральная частота DWDM сигнала, где  $i=1 \dots M$ , ТГц

$N_i$  – любой положительный или отрицательный коэффициент отличный от нуля, где  $i=1 \dots M$ ;

$M$  – общее количество DWDM сигналов в волокне;

$IM_{\text{ПОРЯДОК}}$  – порядок нелинейных искажений.

Эффект смешивания четырех волн не зависит от скорости передачи в битах и определяется интервалами каналов и дисперсией волокна. В то же время уменьшение интервалов каналов и дисперсии увеличивает эффект микширования четырех волн, и поэтому эффект PCI необходимо учитывать даже для систем с умеренной скоростью передачи, когда каналы расположены близко друг к другу и / или используется волокно со смещенной дисперсией.

Для организации двусторонней связи возможны разные технические решения. Например, каждое абонентское устройство может передавать и принимать данные на разных длинах волн, как показано на рисунке 2.10 [7].

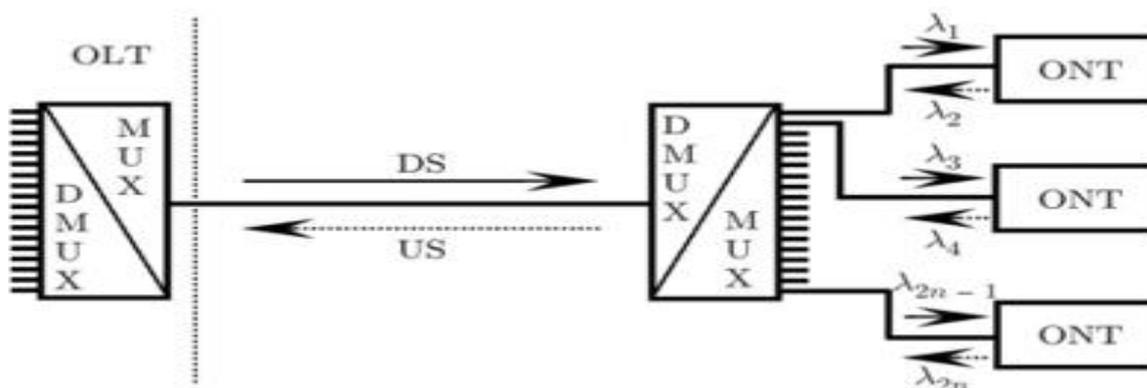


Рисунок 2.10 – Участок сети WDM-PON

Тогда количество длин волн в 2 раза превысит количество абонентских устройств (рисунок 2.11, а). Возникают ситуации, когда целесообразно генерировать оптические несущие (длины волн) на стороне OLT и передавать их абонентским устройствам, где после модуляционных схем (в частности, с помощью отражательных полупроводниковых усилителей-ремодуляторов) на этих несущих будут сформированы восходящие каналы.

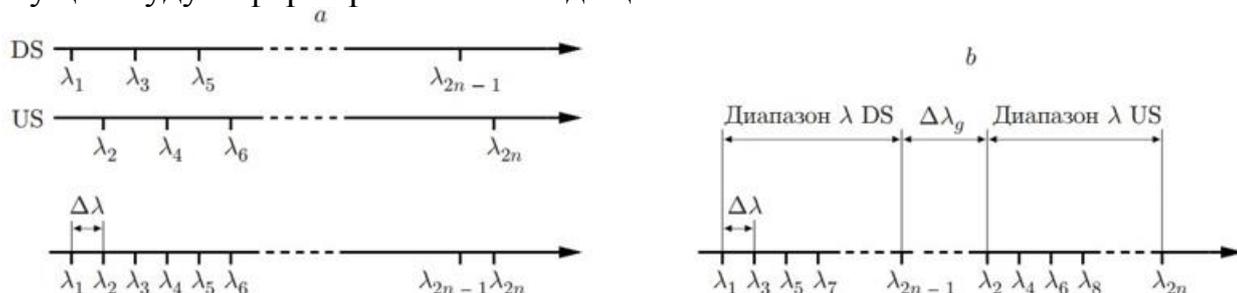


Рисунок 2.11 – Два способа размещения оптических каналов в спектре: а – соседние длины волн выделены определённым ONT; б – DS- и US-направления спектрально разнесены (нечётные каналы предназначены для DS-направления, а чётные – для US

направления)

## 1.5 Фазовая кросс-модуляция

Фазовая самомодуляция - это один из нелинейных эффектов, который эффект Керра входит в группу, приводящую к изменению показателя преломления материала под действием электрического поля, которое выражается в зависимости показателя преломления от интенсивность излучения.

Самомодуляция происходит из-за распространения мощных оптических импульсов. В некоторых случаях это явление может привести к значительному расширению частотного спектра импульса. Самомодуляция ограничивает максимально возможную скорость передачи в оптическом волокне.

В зависимости от того, отрицательная или положительная дисперсия в оптоволоконных волокнах, фазовая самомодуляция может либо расширять, либо сжимать оптический импульс в начале оптического волокна.

Эффект фазовой самомодуляции (ФСМ) начинает проявляться при мощности 8-10 мВт, зависит от типа волокна, поскольку ФСМ влияет только на один канал, он не влияет на другие каналы и не зависит от частоты план. При самомодуляции, нелинейный показатель преломления является причиной фазового сдвига оптических импульсов, и может быть представлен в виде:

$$\Delta\Phi_{CM} = \gamma P_0 L_{\text{эфф}}, \quad (2.34)$$

где  $P_0$  – входная мощность сигнала, Вт;

$A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь сечения оптического волокна, мкм<sup>2</sup>;  $L_{\text{эфф}}$  – эффективная длина волокна, м.

$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}}$  - фазовый сдвиг оптического волокна после распространения на расстояние  $L_{\text{эфф}}$

В системах DWDM нелинейные эффекты, в зависимости от интенсивности световой волны, усиливаются из-за того, что объединенный сигнал всех каналов может быть довольно интенсивным, даже когда отдельные каналы работают с умеренной мощностью.

Из-за присутствия сигналов на других каналах фазовый сдвиг, в зависимости от их интенсивности, усиливает вызванное PSM изменение линейной частотной модуляции импульса. Это явление называется кросс-фазовой модуляцией или кросс-модуляцией (FCM).

Кросс-фазовая модуляция приводит к появлению амплитудных искажений и временного джиттера, которые проявляются тем сильнее, чем выше скорость передачи сигнала и тем меньше частотный интервал между каналами. На практике эффект РСМ в системах WDM, работающих с использованием стандартного одномодового волокна, может быть значительно уменьшен путем увеличения интервалов длин волн между отдельными каналами. Из-за дисперсии волокна константы распространения этих каналов изменяются, и импульсы, соответствующие отдельным каналам,

удаляются друг от друга, что имеет место, например, при интервалах каналов 100 ГГц. Из-за этого явления импульсы, которые изначально совпадали по времени, перестают совпадать после прохождения определенного расстояния вдоль волокна и больше не могут взаимодействовать, тем самым уменьшая эффект FCM. Следовательно, уровень FCM можно контролировать путем правильного выбора разнесения каналов в системах WDM / DWDM. Исследования показали, что только соседние каналы в системах WDM вносят значительный вклад в искажение сигнала, вызванное появлением FCM. Все нелинейные эффекты в оптическом волокне незначительны и требуют большой длины взаимодействия для достижения значительных уровней. Поэтому любой механизм, который уменьшает длину взаимодействия, и уменьшает эффект нелинейности. Однако в волокне со смещенной дисперсией импульсы в разных каналах не удаляются друг от друга, поскольку распространяются с примерно равными групповыми скоростями. Следовательно, FCM может стать серьезной проблемой в высокоскоростных системах WDM (10 Гбит / с и выше) на волокнах со смещенной дисперсией.

Эффект Рамана основан на неупругом рассеянии, при котором частота смещается вниз. В этом случае волна накачки при взаимодействии с сигнальной волной возбуждает колебательную моду молекулы кварца. В результате часть этой энергии превращается в стимулированное излучение фотонов, а остальная часть задерживается в виде молекулярных колебаний. В результате резонанса двух оптических сигналов появляются пики на более низкой частоте 13,2 ТГц (100 нм), что ниже частоты сигнала. Этот пик появляется при 180,21 ТГц (1660 нм) для оптического сигнала с частотой 193,41 ТГц (1550 нм)

В системах DWDM вынужденное рамановское рассеяние «качает» энергию из одного спектрального канала в другой, тем самым отрицательно влияя на систему (рис. 2.17). Это явление охватывает все каналы S- и L-диапазона. Для 10-канальной системы с разнесом каналов около 10 нм входная мощность в каждом канале не должна превышать 3 мВт, поэтому потери мощности остаются менее 0,5 дБ. Дальнейшее увеличение ширины защитной полосы не будет уменьшать количество комбинационных частот, попадающих в каналы. Для уменьшения влияния ВКР необходимо уменьшить промежутки между каналами или вводимую мощность в каналах.

WDM-PON (wavelength Division Multiplexing – пассивная оптическая сеть) - это инновационная концепция для сетей доступа и обратной связи. Оно использует множественные различные длины волны (WDM) над физической точка-многоточка инфраструктурой волокна которая не содержит никакие активные компоненты (PON). Польза различных длин волны учитывает разъединение движения внутри такое же физическое волокно. Результатом является сеть, которая обеспечивает логические соединения точка-точка по физической топологии точка-многоточечная. В WDM-PON позволяет операторам снабдить высокую ширину полосы частот множественные конечные точки на дальние расстояния. Q-фактор - это параметр, который

непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП. Существует определенная функциональная зависимость Q-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок BER. Q-фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрическом уровне, а именно - непосредственно исходя из глаз-диаграммы.

## **2. Модельная реализация линии WDM-PON в программной среде Optisystem**

### **2.1 Принципы организации дуплексных каналов в сетях WDM-PON**

Пару слов о бюджете оптической сети, схема передачи WDM-PON достаточно проста: затухание вызвано потерями MUX/DeMUX и передачи волокна (с учетом разъемов, патч-панелей, и других элементов потерь сигнала, которые могут появляться в инфраструктуре доступа). В системе CWDM-PON, стандартная оптика CWDM может обеспечивать мощность передачи 0dBm, а чувствительность приемника зависит от используемого детектора. Используя PIN, чувствительность 1.25Gbit/s (при условии, что GbE передается) может быть около -18dBm. Это число увеличивается до -28dBm с использованием APD.

Охват системы в случае XGPON определяется разделением. Например, для 28dB бюджета линии и 32 разделения, он, как правило, составляет около 20км. Для WDM-PON, AWG имеет гораздо ниже потерь, чем обычный делитель мощности (50км может быть достижимы). Оба XG-PON и WDM-PON могут быть адаптированы в ситуации Long-reach путем внедрения среднесрочных расширителей. Для XG-PON, могут использоваться ОЕО (Opto-Electric-Optic) и SOA расширители для достижения до 60км (ограниченные протоколом GPON). А для WDM-PON в C/L-диапазоне, он может использовать EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) для достижения до 100км.

Стандартизация предписывает для XG-PON1, что бюджет линии достаточен для GPON B+ и GPON C. Принимая во внимание, что потери эксперимента выше, возникающие в длине волн XG-PON1, чем в длине волны GPON, а также множество других различий в линии передачи между GPON и XG-PON, в зависимости от сравнения с GPON B+ или GPON C, результатом является 29dB и 31dB. Это предписывание не существует для XWDM-PON, и реальный бюджет мощности будет доступен только после того, как первый промышленный продукт будет произведен в объемах.

Для оценки влияния четырехволнового смешения на качество передачи сигнала воспользуемся Q-фактором. В нашем случае для  $i$  канала Q-фактор определяется как  $Q = (P_i/P_{\text{швс}})^{1/2}$ , где  $P_i$  – средний уровень мощности в канале,  $P_{\text{швс}}$  – суммарная мощность комбинационных частот, попадающих в канал. Для достижения вероятности появления ошибки менее  $10^{-12}$  необходимая величина Q-фактора должна превышать 17 дБ. Это справедливо при предположении, что в аппаратуре WDM-PON не применяется прямая или

упреждающая коррекция ошибок.

В качестве примера оценки влияния комбинационных частот на  $Q$ -фактор рассмотрим WDM-PON с 32, 64, 128 каналами. Предположим, что в каналах передаются сигналы с равной оптической мощностью и параметры оптического волокна согласно рекомендациям ИТУ-T G.652 для стандартного одномодового волокна в спектральном диапазоне «С» [11].

Значение  $Q$  и BER имеют однозначное сопоставление. Значение  $Q$  может представлять допуск системы в дБ, точно так же, как дБм заменяет мВт для представления оптической мощности. Меньшее значение BER до FEC указывает на большее значение  $Q$  и лучшую производительность линии.

Отображение между значением  $Q$  и BER:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)$$

$Q$  (дБ):

$$Q(\text{дБ}) = 10 \log_{10}(Q^2) = 20 \log_{10}(Q)$$

При этом выполняется построение функции распределения состояний "1" и "0", а для этих распределений, в предположении их Гауссовой формы, оцениваются математические ожидания состояний  $E1$  и  $E0$  и их среднеквадратические отклонения  $y_1$  и  $y_0$ .

Предварительно, для оценки параметров распределений состояний "1" и "0", определяют точку максимального раскрыва глаз диаграммы.

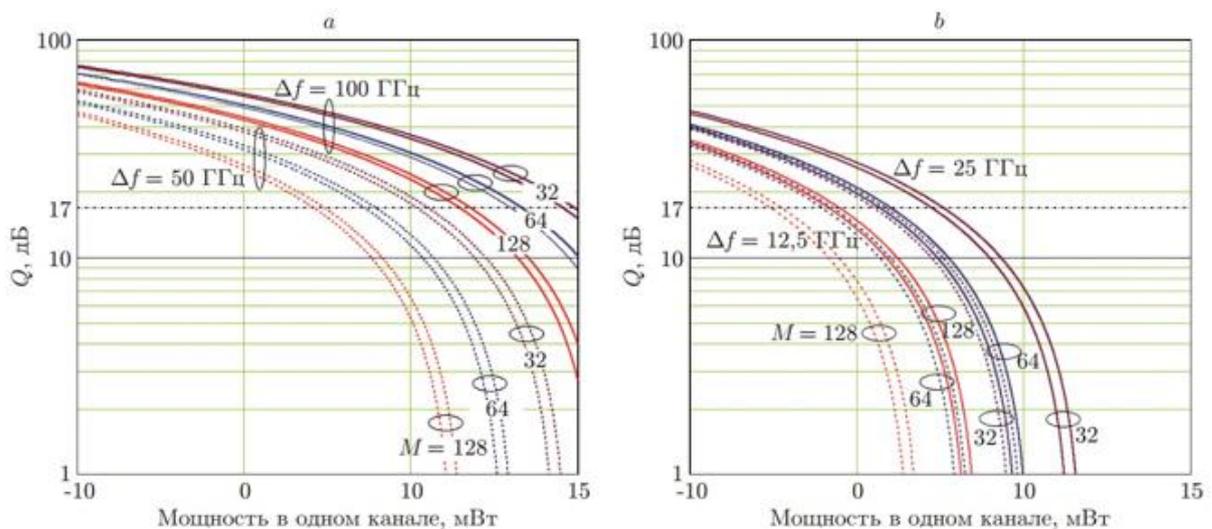


Рисунок 2.15 – Зависимость  $Q$ -factor от мощности на расстоянии  $L = 20$  км при количестве каналов  $M = 32, 64, 128$ :  $a - \Delta f = 100$  и  $50$  ГГц;  $b - \Delta f = 25$  и  $12,5$  ГГц

На рисунке 2.15 показаны зависимости  $Q$ -factor от мощности в канале при длине оптического волокна  $L = 20$  км для каналов, находящихся в наихудшем положении. Кривые соответствуют случаям частотного интервала между каналами  $\Delta f = 100$  и  $50$  ГГц и  $\Delta f = 25$  и  $12,5$  ГГц. Для построения кривых  $Q$ -фактора использовались результаты моделирования из таблицы для однодиапазонного ( $\Delta f_g = \Delta f$ , правые кривые на рисунок 2.15) и двухдиапазонного ( $\Delta f_g = n\Delta f$ , где  $n = M/2$ , левые кривые) случаев. Для заданного  $M$  и при  $\Delta f < \Delta f_g < n\Delta f$  значения  $Q$ -фактора находятся между кривыми, расположенными рядом. Как видно из рисунка, мощность в каналах необходимо ограничивать, чтобы не превышать требуемого значения  $Q$ -фактора.

Рассмотрим возникновение комбинационных частот и их влияние на канал по мере распространения многоканального сигнала по оптическому волокну. На рисунке 2.16 представлены зависимости  $Q$ -фактора от длины волокна  $L$  при разных уровнях оптической мощности в каналах. Дополнительные потери за счет шумов из-за излучения оптической мощности при передаче "нуля" определяются по формуле  $\epsilon$  - отношение мощности оптического излучения источника при передаче "нуля" к мощности оптического излучения при передаче "единицы".

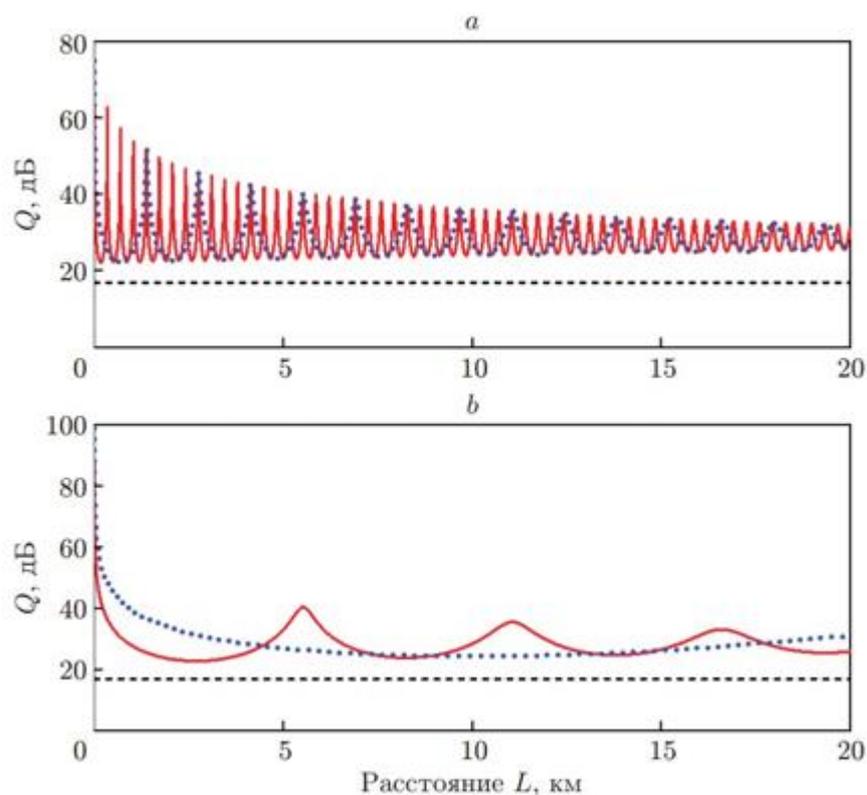


Рисунок 2.16 – Зависимости  $Q$ - фактора от дальности передачи для WDM- PON с 32 каналами при разных значениях частотного интервала и уровня мощности в каналах:  $a - \Delta f = 100$  ГГц,  $P_i = 12$  дБм (сплошная кривая),  $\Delta f = 50$  ГГц,  $P_i = 6$  дБм (точечная кривая);  $b - \Delta f = 25$  ГГц,  $P_i = 0$  дБм (сплошная

кривая),  $\Delta f = 12,5$  ГГц,  $P_i = -6$  дБм (точечная кривая)

Анализ показывает, что на расстояниях  $L < L_{\text{эф}}$  (в нашем случае  $L_{\text{эф}} \sim 20$  км) наблюдается осциллирующая зависимость  $Q$ -фактора. Наибольшее значение  $Q$ -фактор принимает в точке ввода излучения в оптическое волокно, наименьшее значение отмечается на расстояниях порядка от нескольких сотен метров от начала ввода излучения в волокно до нескольких километров (в зависимости от частотного интервала). По мере увеличения расстояния передачи ( $L > L_{\text{эф}}$ ) величина  $Q$ -фактора стабилизируется и имеет незначительные отклонения.

Рисунок содержит примеры, соответствующие таким уровням мощности в каналах, при которых имеется почти одинаковая амплитуда осцилляции значения  $Q$ -фактора при её разных периодах. Для удержания  $Q$ -фактора в определённых пределах при уменьшении частотного интервала в 2 раза необходимые уровни мощности в каналах следует снизить почти в 4 раза.

На рассмотренном участке сети WDM-PON, где размещение оптических каналов по спектру имеет разную конфигурацию, результаты моделирования распределения по спектру комбинационных частот четырёхволнового смешения показывают, что при равномерном размещении спектральных каналов в наихудшем положении оказывается средний канал. При неравномерном размещении каналов спектр комбинационных частот ЧВС может принимать многопиковый характер. В случае, когда спектральные каналы расположены равномерно в спектральных диапазонах и между ними существует защитная полоса, количество нежелательных помех от ЧВС, попадающих в каналы, уменьшается. Оценивая влияние ЧВС на  $Q$ -фактор, становится очевидно, что превышение уровня оптической мощности в спектральном канале может повлечь за собой резкое уменьшение  $Q$ -фактора из-за четырёхволнового смешения. Таким образом, для достоверной передачи информации необходимо ограничить уровень максимальной мощности в каналах, или увеличить частотный интервал между каналами, или сократить количество каналов.

## 2.2 Схемы построения линии по технологии WDM-PON

В общем случае в сетях WDM-PON для обеспечения двусторонней связи с  $N$  абонентами присутствует участок сети, состоящий из оптических мультиплексоров/демультиплексоров и модулей SFP (CWDM и DWDM).

Пример структуры сети доступа типа «точка - много точек» со спектральным мультиплексированием и маршрутизацией оптических каналов приведён на рисунке 4.6[42].

На стороне OLT предлагается поставить источники сигнала, задать определенную длину волны и объединить их в WDM мультиплексе. Далее собранный множественный сигнал пустить на линию.

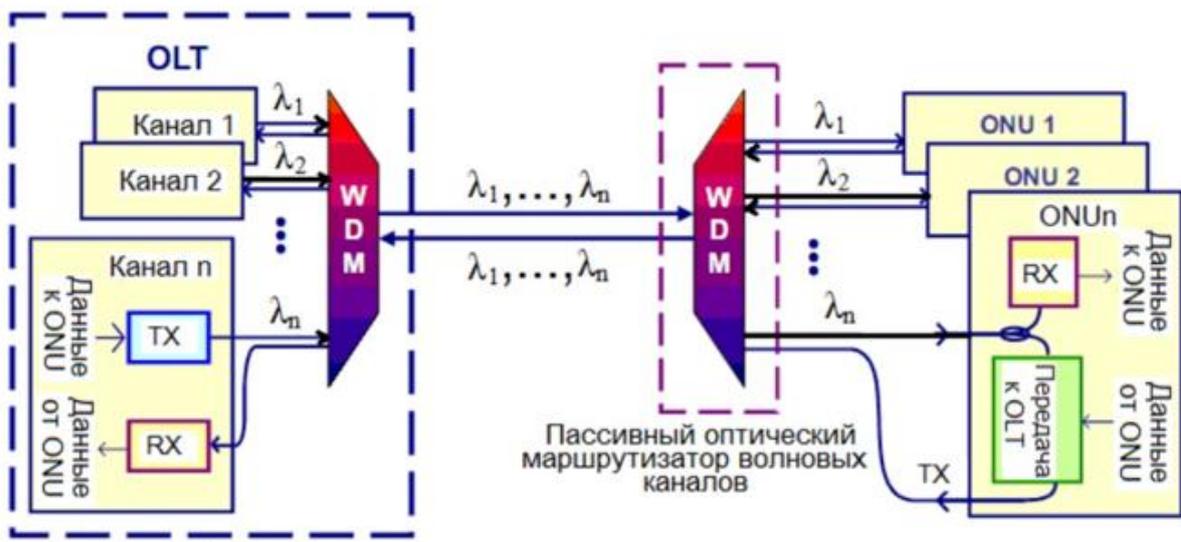


Рисунок 4.6 – Пример структуры сети доступа спектрального мультиплексирования в PON применением

Расширить возможности выше приведённой структуры можно применением гибридного мультиплексирования WDM-TDM (рисунок 4.7), где на каждой оптической волне может поддерживаться трафик для многих ONU. Волновая маршрутизация сочетается с пассивным делением оптической мощности в сплиттерах для прямого направления. В обратное направление используется общий оптический канал на волне  $\lambda_x$ , который работает в режиме с разделением по времени TDM.

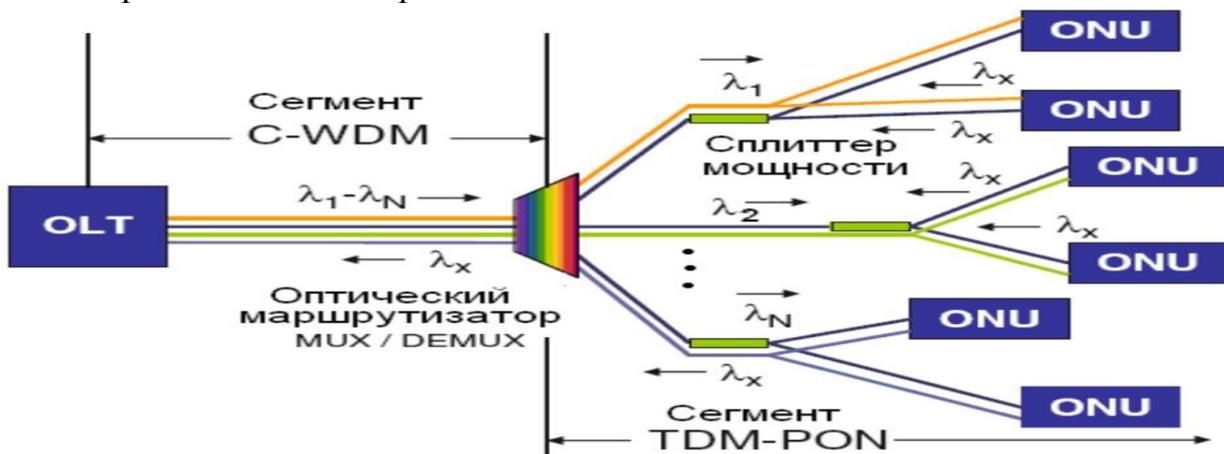


Рисунок 4.7 – Структура гибридного мультиплексирования в PON

Для организации двусторонней связи возможны разные технические решения. Например, каждое абонентское устройство может передавать и принимать данные на разных длинах волн. Однако, экономически и технически выгодно в WDM-PON-сетях организовать двухстороннюю связь конкретного абонента на одной длине волны (сколько абонентов столько длин волн). Отсутствие источников излучения в абонентском оборудовании ONT и генерирование линейки несущих оптических частот на стороне OLT делает сеть «гибкой», что позволяет в будущем поэтапно увеличивать пропускную

способность сети без капитальных затрат. Одним из таких способов организации связи является использование в ONT отражательных полупроводниковых усилителей-ремодуляторов RSOA (Reflective Semiconductor Optical Amplifier) взамен традиционных оптических передающих модулей [41]. Структурная схема сети представлена на рисунке 4.8.

WDM-PON использует несколько оптических длин волн для увеличения полосы пропускания восходящего и / или нисходящего каналов, доступных конечным пользователям. Будучи идентифицирована как «технология будущего», WDM PON обещает предоставить оптическую технологию, которая будет дешевле и проще в развертывании, а также удовлетворяет потребности конечных пользователей в более высокой пропускной способности.

Это оборудование того же типа, что и в современной инфраструктуре PON, в котором обычно располагается OLT (терминал оптической линии) в точке центрального офиса, а затем устройство, которое обслуживает клиентов, так называемое ONT, терминал оптической сети.

Таким образом, WDM PON будет использовать те же концепции OLT и ONT. С точки зрения портфеля ведущих компаний (WDM PON), OLT и мультисервисной платформы доступа, обе они были разработаны с высокой пропускной способностью и высокой пропускной способностью для коммутации, преподносится эволюция от GPON к WDM PON.

Иными словами, эти устройства могут быть обновлены и будут модернизированы для поддержки WDM PON с обновлением программного обеспечения и модулем линейной карты, который будет переходить от модуля с одной длиной волны, который мы используем в EPON, GPON сегодня, к тому, что будет иметь несколько длин волн для сети WDM PON.

В дополнение к этому сейчас ведется большая работа в области сетки длин волн, которую мы будем использовать для этих нескольких длин волн. Эта работа в основном сфокусирована на идее наличия GPON ONT, она остается совместимой с WDM PON OLT сеть. В этом случае GPON ONT, который уже установлен у оператора услуг связи, можно продолжать использовать и развертывать буквально бок о бок, с поддержкой ONT WDM PON в будущем.

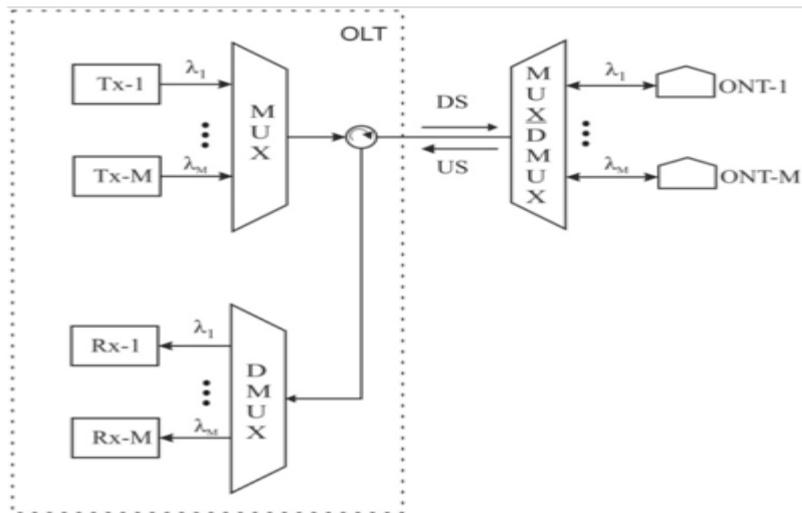


Рисунок 4.8 – Структурная схема WDM-PON-сети

Оборудование OLT состоит из передающих оптических модулей Tx-m (Tx Transmitter) и приемного Rx-m (Rx Receiver) ( $m = 1 \dots n$ ), мультиплексора / демультиплексора (MUX / DMUX), оптических усилителей (OA) и Оптический циркулятор. Для обеспечения двусторонней связи с N абонентами в разветвленной части сети есть секция, где расположен оптический MUX / DMUX. Как и MUX / DMUX, упорядоченные волноводные решетки (AWG Arrayed Waveguide Grating), которые широко используются в современных волоконно-оптических системах передачи, выпускаются в виде готовых модулей, имеют высокую плотность каналов при определенной оптической волоконной прозрачности. окно. небольшие потери и габариты.

WDM-PON представляет собой технологию доступа сети, которая может значительно изменить инфраструктуры оператора. WDM-PON создает логическую точка-точка архитектуру на основе длины волны по физической точка – многоточка топологии. Он использует технологию мультиплексирования/демультиплексирования WDM для обеспечения того, чтобы сигналы данных могли быть разделены на отдельные выходные сигналы, которые подключены к зданиям или домам. Такое разделение трафика на основе аппаратного обеспечения предоставляет клиентам преимущества безопасной и масштабируемой точка-точка линии длины волны, но позволяет оператору сохранять очень низкое количество волокон, что приводит к значительно меньшим эксплуатационным расходам.

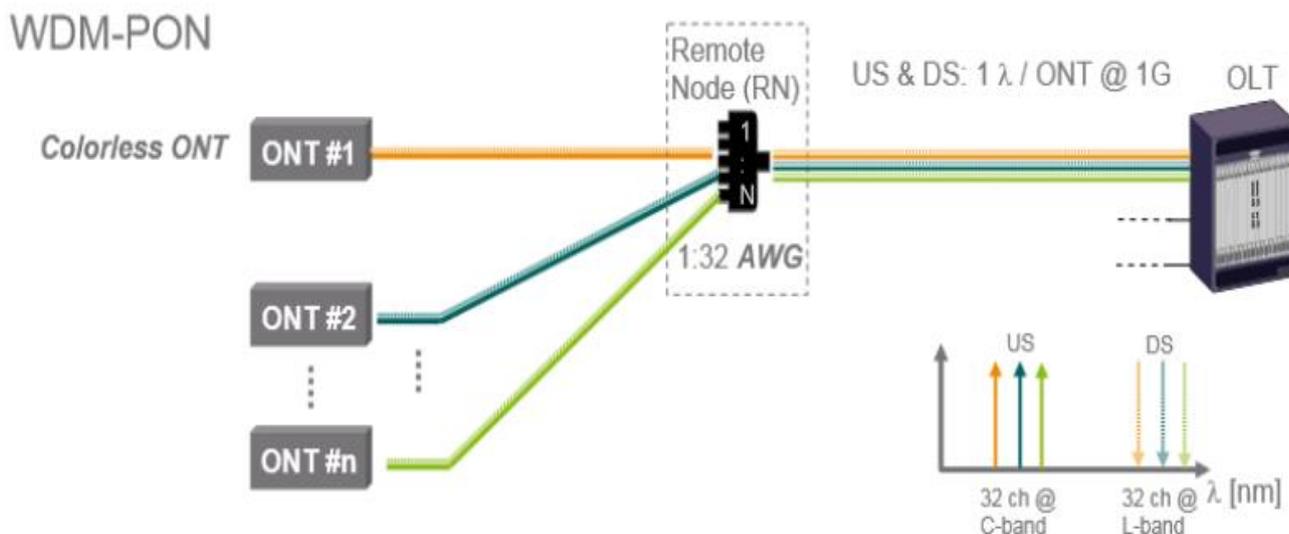


Рис 4.8 а – Организация связи по технологии WDM-PON

В оборудовании ONT после делителя оптический сигнал фотодетектируется и демодулируется (рис. 4.11, б). Этот метод передачи может использоваться операторами беспроводной связи для «доставки» на поднесущие DS каналов с различным форматом модуляции без какого-либо преобразования канала. Такие системы передачи были экспериментально протестированы [51, 52], где потоки сигналов со скоростью 10 Гбит / с передавались в двух направлениях на расстояние до 20 км.

В рассмотренном примере реализации WDM-PON-сетей имеются следующие преимущества:

- отсутствие в абонентском оборудовании дорогостоящих и неуправляемых стационарным оборудованием оптических источников излучения, а также применение экономически выгодного прямого фотодетектирования оптических сигналов;
- высокая спектральная эффективность, достигаемая оптимальным использованием спектральных дуплексных каналов;
- возможность поэтапного наращивания количества спектральных дуплексных каналов, и, следовательно, увеличения пропускной способности сети без разрушения существующей конфигурации сети и без замены существующих абонентских терминалов

Мы знаем, что WDM-PON снабжает каждого абонента длиной волны, а не делит длину волны между 32 или более абонентами в TDM PON, что обеспечивает более высокую пропускную способность. WDM-PON рассматривается как возможное решение для систем PON следующего поколения в конкуренции с TDM PON за то что, WDM-PON позволяет каждому пользователю назначить одну или несколько длин волн, что позволяет каждому абоненту получать доступ ко всей полосе пропускания, соответствующей длинам волн.

Сети WDM-PON обычно обеспечивают лучшую безопасность и масштабируемость, поскольку каждый дом получает только свою собственную длину волны, это в случае протяжки сети в отдаленную сельскую местность.

Управление уровнем MAC в WDM-PON более упрощено, чем TDM PON, поскольку WDM-PON обеспечивает P2P-соединения между OLT и ONU и не требует двухточечных контроллеров (P2MP), которые существуют в других сетях PON.

Длина волны в сети WDM-PON на самом деле представляет собой канал P2P, который позволяет каждой линии работать на разных скоростях и с различным протоколом для максимальной гибкости и обновления с оплатой по мере использования.

Внедрение технологий WDM-PON, приемлемых с точки зрения достижимой пропускной способности для реализации в современных сетях доступа, предполагает использование специальных новых компонентов волоконной оптики, таких как отражающие полупроводниковые усилители-модуляторы, полупроводниковые лазеры с гребенчатым спектром излучения, перестраиваемые лазеры с внешней синхронизацией и рядом других.

Основные преимущества WDM-PON:

- пользователю предоставляется выделенная полоса (без конкурса);
- с увеличением количества абонентов затухание в мультиплексоре WDM увеличивается в меньшей степени, чем в оптическом разветвителе;
- сигналы абонентов физически изолированы;
- волокно используется эффективно.

Преимущества волнового мультиплексирования состоят в том, что они полностью отделены друг от друга. Это не мешает разным длинам волн в их первоначальном виде.

Однако в топологии, где используется дерево, WDM-PON остается существенным недостатком - ONT по-прежнему не могут связываться друг с другом без участия OLT. Преодолеть этот недостаток можно, заменив древний сплиттер типа NxN. В этом случае, если ресурсов по количеству каналов недостаточно, можно использовать взаимодействие как с OLT, так и независимо от абонентской линии ONT: «первая линия» длинных волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$  используется для взаимодействия с OLT, «вторая линия» Длинные волны  $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \dots, \lambda_{N+K}$  используется для прямого взаимодействия между абонентскими сегментами сети ONT. NxN передает во всех каналах., в т.ч.

производить подписчиков (ONT) и ATS (OLT), а OLT вообще игнорирует длину волны «второй линии».

Другим недостатком WDM-PON является высокая стоимость, поскольку требуются узкополосные передатчики, излучающие на обратной длине волны. Это особенно важно для абонентских устройств, так как их стоимость напрямую влияет на стоимость абонентской линии. Проблема в том, что стоимость оптических компонентов для технологий WDM-PON будет

значительно ниже текущего уровня.

Несмотря на эти привлекательные функции, существуют также некоторые недостатки, которые препятствуют реализации сетей WDM-PON.

При реализации WDM-PON нужно использовать маршрутизаторы длины волны или делители мощности в ONU, и оба метода нуждаются в бесцветном ONU.

Для системы WDM-PON большой дальности защита необходима для обеспечения надежности и производительности сети.

Что касается проблем, которые остаются в развертывании WDM-PON, здесь мы предлагаем некоторые решения для вашей справки.

ONU в WDM-PON должны быть бесцветными, что означает, что никакие ONU не зависят от длины волны, чтобы снизить эксплуатационные, административные, эксплуатационные и эксплуатационные расходы. Для решения этой проблемы предлагается локальная эмиссия. В основном, существует два локальных подхода к излучению: установка длины волны и ограничение спектра. Подход с длиной волны ONU состоит из настраиваемого лазерного диода (TLD – tunable laser diode) в качестве передатчика (Tx), оптического приемника (Rx) с селектором длины волны (WS) и WDM-ответвителя, который разделяет или объединяет сигналы восходящей и нисходящей линий связи. Конфигурация ONU в методе спектрального разделения аналогична конфигурации с настройкой длины волны, за исключением того, что вместо TLD используется широкополосный источник света (BLS) с WS. Что касается сети с большим радиусом действия, защита фидерного волокна, которое передает данные от потенциального повреждения, является жизненно важной. Тогда возникает вопрос о том, как добиться защиты. Предлагается использовать оптические отводы 3 дБ, которые можно использовать для разделения или объединения пути сигналов WDM к рабочему и защитному волокнам в OLT или в маршрутизаторе длины волны или от них. Обратите внимание, что OLT и маршрутизатор длины волны обычно расположены в центральном офисе (CO) и в точке доступа (AN), соответственно. Однако этот метод защиты имеет низкий бюджет потерь из-за использования оптических отводов 3 дБ. С этой целью была предложена схема защиты со сдвигом длины волны, которая использует циклическое свойство решетчатого волновода  $2 \times N$  (AWG) и два распределения длин волн для работы и защиты. В этом случае оптические отводы на 3 дБ не нужны.

WDM-PON является наиболее перспективным и масштабируемым долгосрочным решением для обеспечения высокой пропускной способности для конечного пользователя. Между тем, достижения в ключевых технологиях устройств заложили основу для внедрения высокопроизводительной и недорогой системы WDM на основе PON. Таким образом, в конкуренции с другими технологиями высокоскоростных сетей доступа WDM-PON считается наиболее благоприятным для требуемой полосы пропускания в ближайшем будущем.

## 2.3 Экспериментальное исследование в программной среде Optisystem

Для достижения поставленной цели была выбрана древовидная структура сегмента PON, показанная на рисунке 2.1.

В ее состав входят:

- центральное устройство коммутации и маршрутизации пакетов (ЦУКМП);
- приемо-передающие дуплексные оптические сменные модули, настроенные на используемые длины волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  (устанавливаются в специальные гнезда ЦУКМП);
- сетевое окончание центрального узла OLT, оснащенное WDM-мультиплексором и устройствами разделения (пассивные оптоволоконные устройства);
- одноволоконная магистральная оптическая линия до 30 км;
- пассивный узел ПУ, представляющий собой WDM-мультиплексор;
- абонентские оптические линии  $\lambda_i \dots \lambda_n$  длиной до 3 км;
- разветвители  $1 \times 2 P_1 \dots P_N$ ;
- SFP-модули, настроенные на соответствующие длины волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ ;
- Устройства коммутации и маршрутизации пакетов (оконечные УКМП<sub>1</sub>...УКМП<sub>N</sub>).

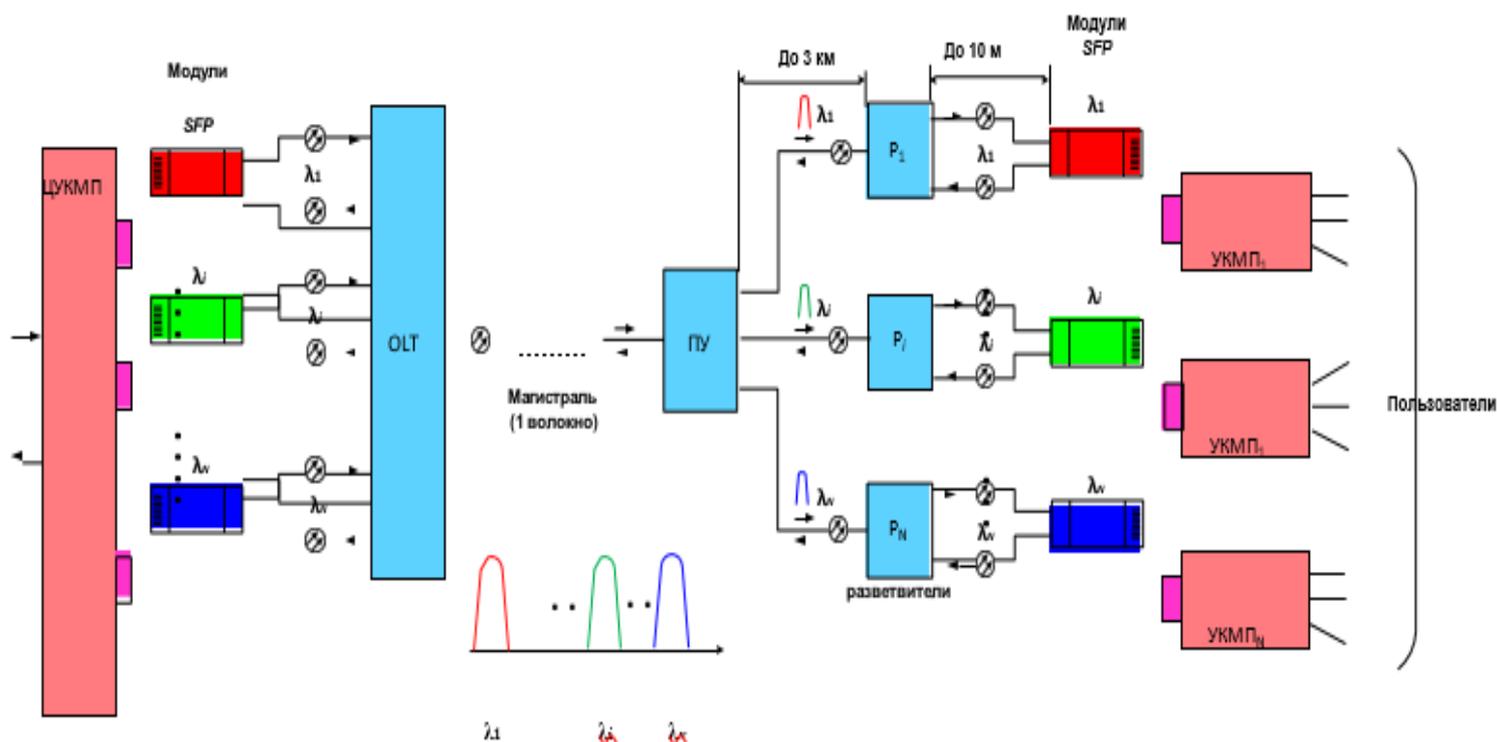


Рисунок 2.1– Структура сегмента элементов WDM-PON

В качестве DCC мы можем использовать любой коммутатор или маршрутизатор, который может устанавливать модули SFP на каждый порт. В качестве SFP-модулей можно использовать любые доступные внутри страны модули. Например, от недорогих линий CWDM (Coarse Wave Division Multiplexing - грубое разделение волн, до 16 длин волн).

Модули следует выбирать со значительным превышением

максимальной длины линии, заявленной производителем, относительно длины магистральной линии, чтобы обеспечить перекрытие затухания элементов пути пассивной сети. Таким образом, при расчетной длине магистральной линии 30 км (с последующим испытанием на лабораторной испытательной линии 40 км с положительным результатом) авторы [56] выбрали модули SFP, рассчитанные на длину линии от точки до точки до 80 км, например, TBSF15d - 80-12g-LC-3c, для соответствующих используемых длин волн CWDM-сетки.

Доступные на рынке мультиплексоры CWDM-MUX использовались в качестве оконечного устройства центральной станции OLT (CWDM-MUX 1x4 1550-1610 3,0 LC / APC 1,5 м был использован для четырехпортового лабораторного прототипа). Устройства подключены к каждому из разделенных портов мультиплексора для разделения направлений распространения. Эти устройства основаны на планарных сплиттерах 1x2, которые обеспечивают значительное ослабление противоположного направления распространения (до 30-40 дБ).

Линия длиной 20, 40, 50 км использовалась в качестве одноволоконной оптической линии в испытанном лабораторном прототипе, построенном в программной среде Optisystem. Все соединения с линиями в сети, особенно с магистральными линиями, за исключением портов модуля SFP, должны выполняться с использованием разъемов SC / APC (зеленая маркировка), которые обеспечивают минимальное отражение. Это особенно важно для предлагаемой технологии.

Пассивный узел использует мультиплексор, аналогичный тому, который используется в OLT (без разделительных устройств). В ONT использовались модули SFP, аналогичные тем, которые использовались в OLT. Для разделения направлений передачи в ONT использовались сплиттеры, аналогичные тем, которые использовались в OLT. В качестве конечного MCMР были использованы однопортовые коммутаторы Ethernet с разъемами для установки модулей SFP. Предполагается, что предложенная технология будет использоваться в решениях класса FTTB, а абонентская проводка внутри здания должна выполняться с использованием стандартного сетевого кабеля 5-й категории на основе витых пар.

Поскольку отличие предлагаемой сети состоит в применении в ее сегментах принципа разделения направлений передачи по направлениям распространения светового потока, в такой сети неизбежно возникает помеха (помеха) направлений передачи, что является дополнительным источником специфических помех и ограничений. Выбор длины волны также может быть достигнут путем фильтрации у пользователя. В восходящем соединении аналогичным образом используется выделенный канал длины волны.

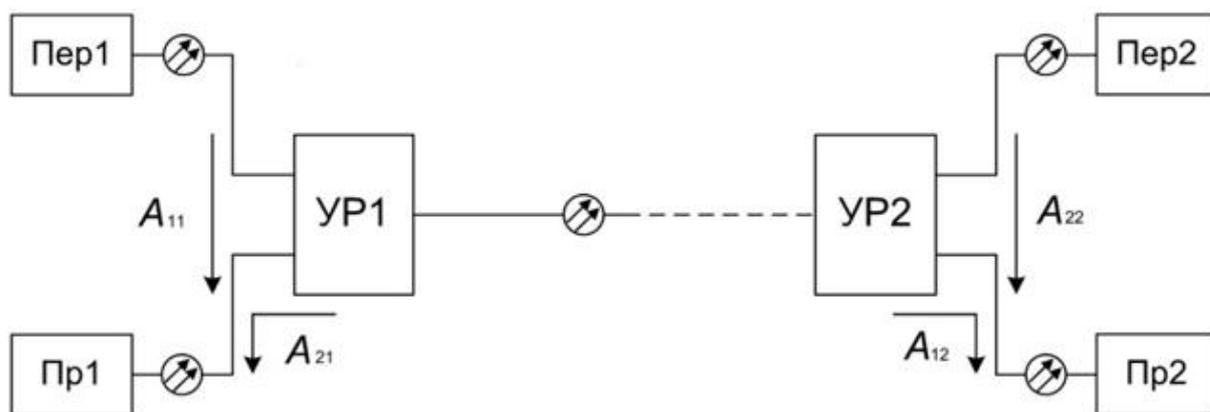


Рисунок 2.2 – Структура дуплексного канала

Структура дуплексного канала в сегменте предлагаемой сети приведена на рисунке 2.2. В его состав входят: передатчик стороны 1 - Пер.1, приемник стороны 1 - Пр.1, устройство разделения стороны 1 - УР 1; аналогично для стороны 2: УР 2; Пер. 2, Пр. 2.

На вход приемника стороны 1 поступает полезный сигнал с мощностью  $P_{\text{ПС1}} = P_2 A_{21}$ , и сигнал интерференционной помехи с мощностью  $P_{\text{ПОМ}} = P_1 A_{11}$ , где  $P_2$  - мощность передатчика на противоположной стороне линии,  $A_{21}$  - суммарное затухание линии и устройств УР1, УР2, выраженное в отношениях в направлении Пер.2 - Пр.1,  $P_1$  - мощность передатчика на стороне 1,  $A_{11}$  - затухание интерференции, выраженное в отношениях и определяемое характеристиками УР, а также отражениями и обратным рассеянием в оптическом тракте. Это затухание будем называть затуханием изоляции (на каждой стороне). Технология WDM, как и любая другая технология, приносит новые проблемы наряду с преимуществами. Надежная и стабильная работа современных систем WDM невозможна без контроля качества оптических характеристик и поведения системы.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Параметры	Диапазон	Номинальные значения
Источник излучения (вых.мощность $P_{\text{out}}$ )	0...18 dBm	0...18 dBm
Частота передачи данных (межканальный интервал)	193.1-193.4 THz (0.2nm) 193.1-193.9 THz (0.1nm)	193.1-193.9 THz
Дистанция (L)	20-50 km	
Тип волокна(затухание)	G.652 (SMF)	0.21 dB/km
	G.655 (SMF)	0.19 dB/km
Каскад сплиттерования	1x4	6db
	1x8	10db

В Optisystem была построена схема с использованием сплиттера 1x4 при дистанции  $L=25$  km.

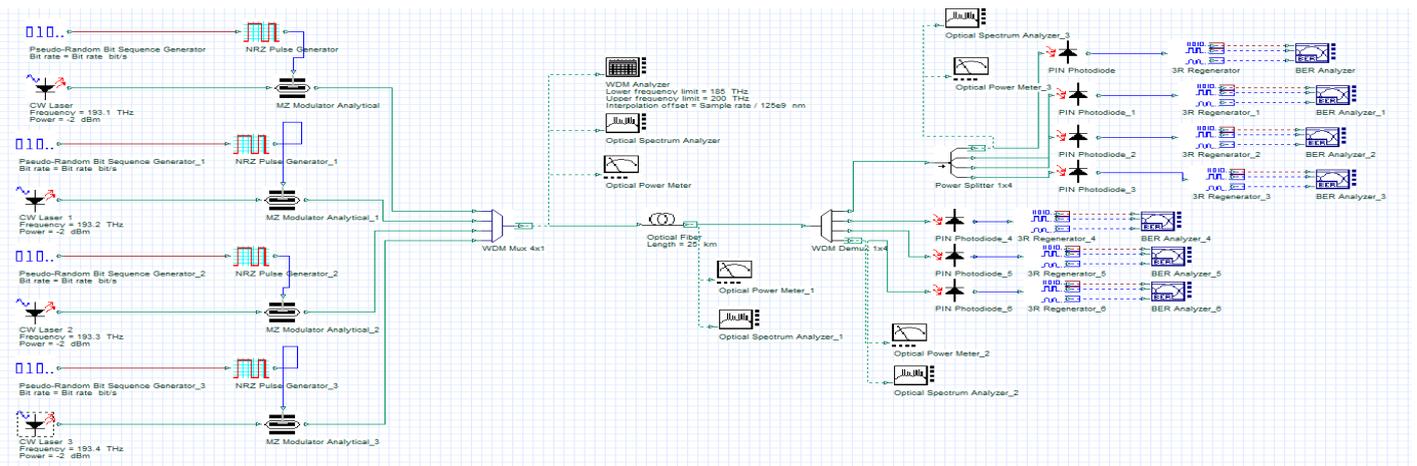


Рисунок 2.3 – Схема WDM-PONc использованием сплиттера 1x4 в Optisystem

В данной схеме добавлено 4 длины волны использованы модулятор, пульс генератор и сам лазер которые генерируют сигнал, уходящий в линию. Сигналы с каждой длины волны собираются на WDM мультиплексоре и передаются на линию с мощность сигнала 10 дБм.

После прохождения по линии, сигнал подвергается затуханию. На следующем этапе цепи, сигнал доходит до мультиплексора. Я выделил отдельно одну длину волны и поделил ее воспользовавшись разветвитель 1x4, остальные идут без деления сплиттером. Ниже указал скриншоты и рисунки проведенных работ, на которых можем заметить анализ спектра, результаты значений на оптическом измерителе мощности, как они затухают после каждого пройденного элемента сети.

Далее был рассмотрен вариант с добавлением усилителя и соответственно увеличения дистанции передачи данных, то есть с 25 км до 50 км.

WDM PON использует несколько различных длин волн в физической многоточечной оптоволоконной инфраструктуре, которая не содержит активных компонентов (PON). Каждый из них обеспечивает выделенный канал с длиной волны со скоростью 1 Гбит / с для каждого оптического сетевого блока (ONU).

Использование разных длин волн позволяет разделять трафик внутри одного физического волокна. В результате получается сеть, которая обеспечивает логические соединения точка-точка в физической топологии точка-точка. WDM-PON позволяет операторам предоставлять широкую полосу пропускания нескольким конечным точкам на больших расстояниях. Использование одного волокна достигается с помощью WDM: ONT передает сигнал на длине 1310 нм, OLT - на 1490 нм. Другая длина волны - 1550 нм – может быть использована для передачи видеосигнала в радиочастотном диапазоне (РЧ видео), а также в сетях кабельного телевидения. Хотя IP-видео может предоставлять более широкий спектр услуг.

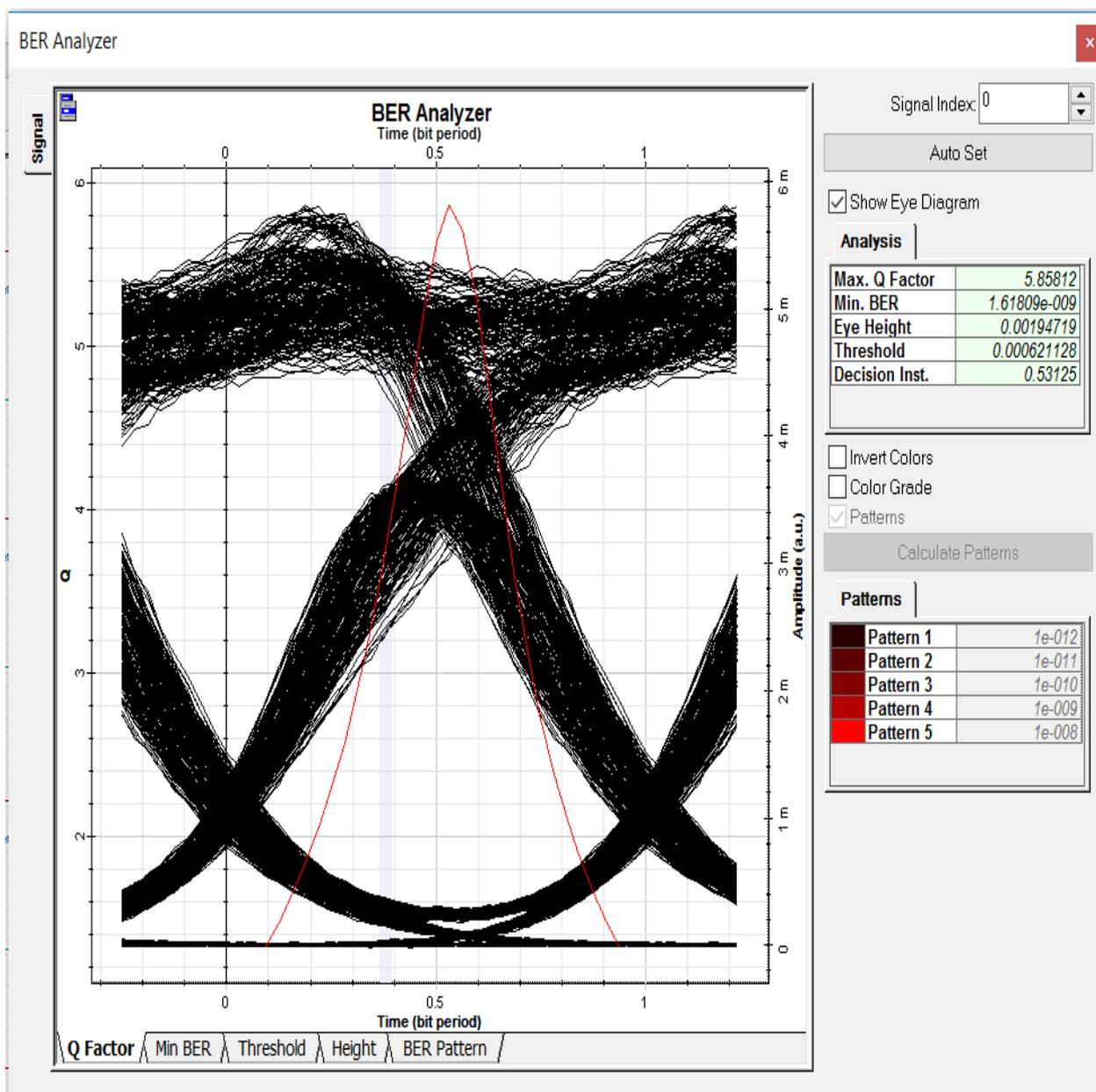


Рис 5.1 – Характеристика глаз-диаграммы битовых ошибок при  $L=25$  km

Глаз-диаграмма представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени.

Исходя из данного графика результата BER мы можем видеть, что имеются шумы на линии, но показатель Q-factor находится в диапазоне  $1,6 \times 10^{-9}$ , что означает, что сигнал в принципе не плохой и доходит до конечного абонента в хорошем качестве. Под BER следует понимать отношение количества ошибочных битов к их общему переданному числу.

Временные искажения глаз-диаграммы  $\Delta T$ , включающие несоответствие моментов решения их статическим значениям и джиттер, учитываются обычно в смещении границ «глаза» по горизонтали.

Очевидно, что для компенсации ухудшения реальной глаз-диаграммы по сравнению с идеальной необходимо увеличить величину отношения сигнал/шум на величину  $\Delta S/N = 20 \lg (H/h)$ , дБ, где  $H$  и  $h$  представляют собой вертикальный «раскрыв» идеальной и реальной глаз-диаграмм, соответственно.

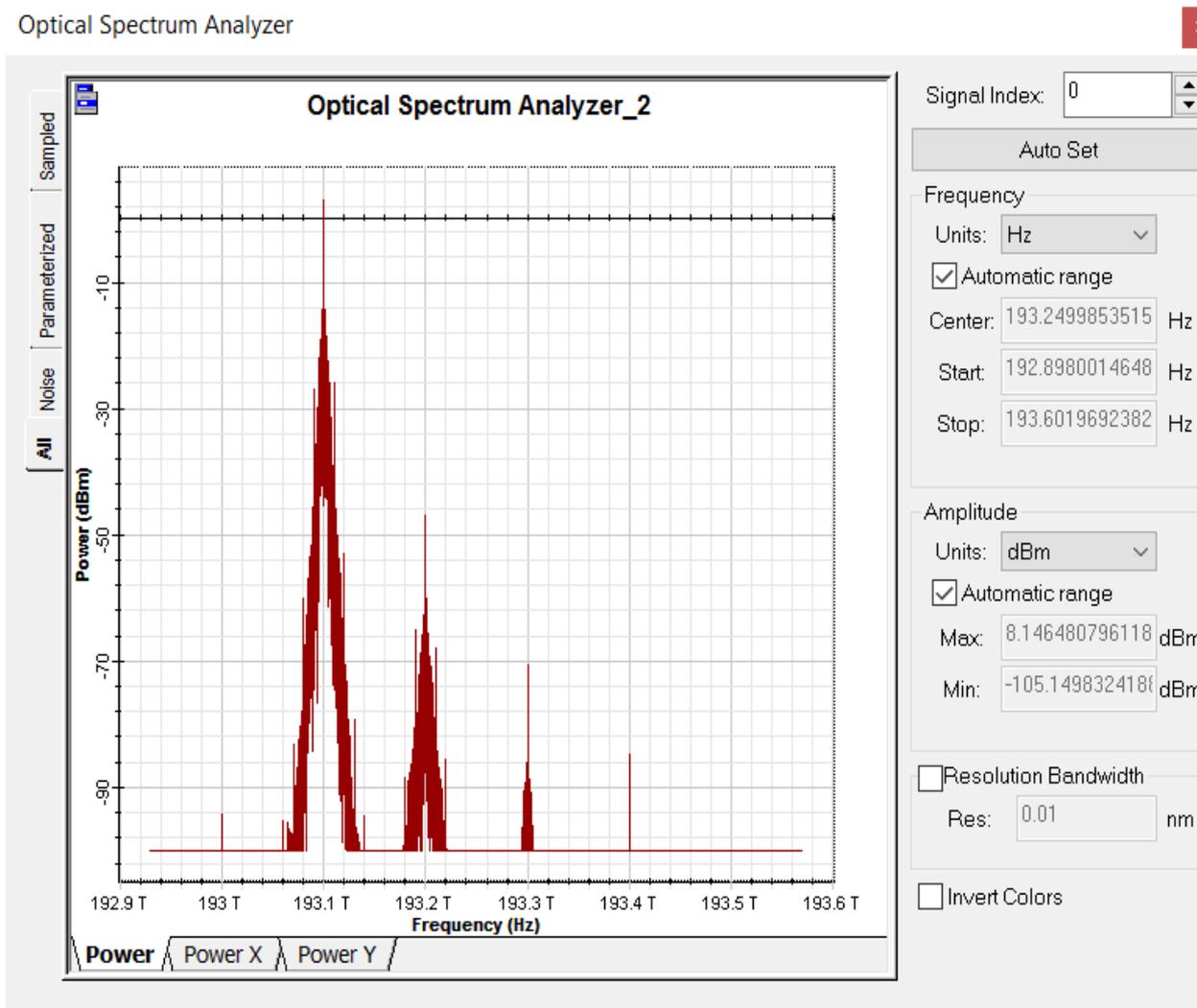


Рисунок 5.2 – Спектр анализ длин волн

На рисунке 5.2 изображен спектр анализ длин волн. Исходя из графика, мы можем заметить, что спектр не одинаковый для всех длин волн, так как на трансиверах в линии были поданы на Rout разные сигналы.

Так же, для интереса эксперимента попробуем подать на передатчики одинаковый сигнал. Спектр является очень важной характеристикой сигнала и связан с одноразовой зависимостью сигнала от времени. Если тип сигнала известен, спектр сигнала может быть рассчитан с использованием так называемого преобразования Фурье. И наоборот, зная амплитудно-фазовый спектр, вы можете определить тип сигнала по оси времени, рассчитав обратное преобразование Фурье. Естественно, принятые эхо-сигналы также характеризуются спектром, который может быть рассчитан с использованием преобразования Фурье.

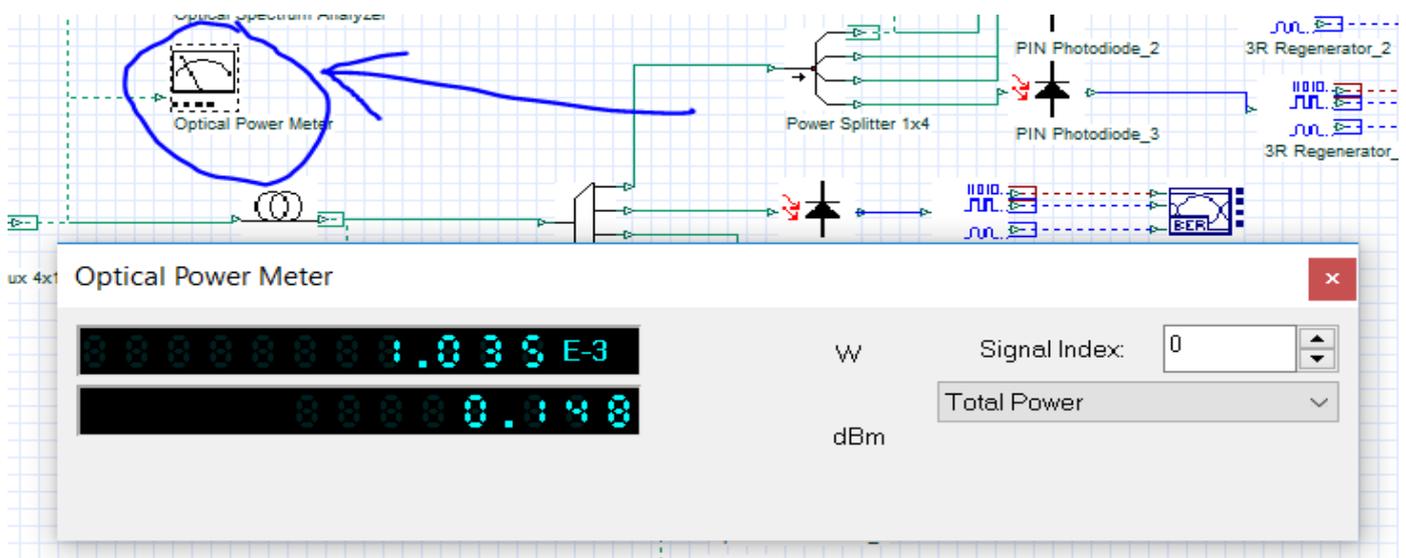


Рисунок 5.3 - мощность сигнала на входе в линию

Из данного рисунка мы видим, что сигнал заходит в линию с мощностью 0,148 дБ.

Построение глаз-диаграммы осуществляется путем наложения отклика системы в предположении гауссовой формы импульса на передачу "изолированного" логического "0" в последовательности логических "1" (например, комбинация 101 - при 3-х символьной последовательности): и отклика системы на передачу "изолированной" логической "1" в последовательности логических "0" (например, комбинация 010 - при 3-х символьной последовательности), где  $sL$  - среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП; данная величина непосредственно связана с  $TL$  следующим соотношением,  $T$  - интервал передачи битовой последовательности, где  $N_{symb}$  - количество символов битовой последовательности, в данном случае принять  $N_{symb} = 3$ ,  $\phi_{05}$  - длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения, обратно пропорциональна скорости передачи сигнала в линии. Построение глаз-диаграммы в диапазоне  $(-2.T; 2.T)$ . Глаз-диаграмма является результатом многократного перекрытия битовых последовательностей с выхода генератора SRP, отображаемого на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени. Пример глазковой диаграммы, показывающей основные параметры, показан на рисунке 5.3

Эффекты расширения импульса, а также джиттера, вызывают взаимное искажение между символами, что приводит к пересечению диаграммы зрения с осью времени на разных временных интервалах. Максимальная ширина области пересечения с временной осью определяется как пиковый джиттер или джиттер данных  $T_j$ . Джиттер обычно измеряется в единицах времени или как отношение к интервалу передачи символов  $T_j / T_s$ . В данной работе стандартные отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  соответствуют относительным / минимальным значениям амплитуды сигнала во время передачи «1» и «0».

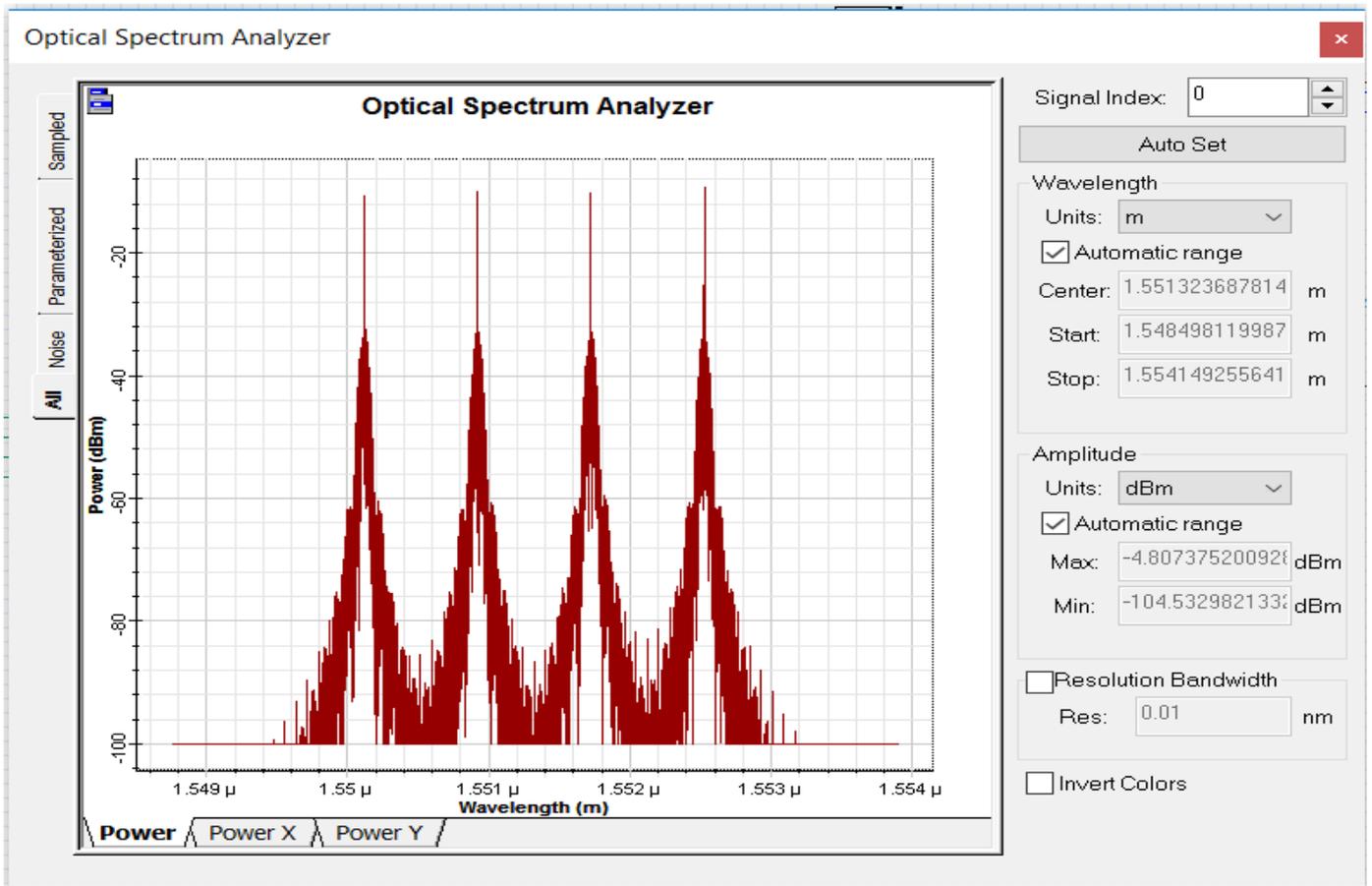


Рисунок 5.4 – Спектр анализ на входе в линию

По спектр анализу видно, что мощность передатчиков, перед тем как зайти в линию, равна между собой.

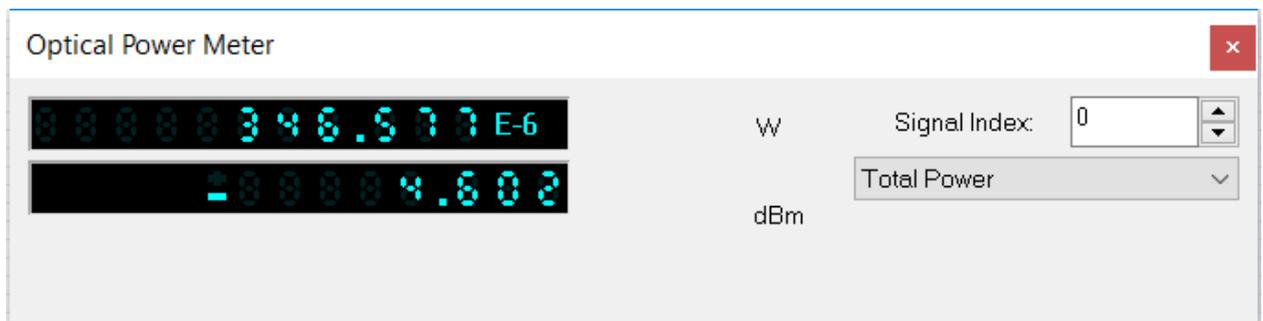


Рис 5.5 - Мощность сигнала на выходе из линии (L=25 км при затухании 0,19дб/км)

По данным, которые были взяты с оптического измерителя мощности, можем наблюдать изменение в мощности на выходе из линии. Так как длина линии составляет L=25 км, можем сделать расчет затухания

$$A = 25 * 0,19 = 4,75 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{out}} - A = 0,1 - 4,75 = -4,6 \text{ дБм}$$

Можно сделать вывод, что данное значение полностью совпадает со

значением, которое было получено оптическим измерителем мощности. Эту же цифру наблюдаем на измерителе мощности (рисунок 5.5)

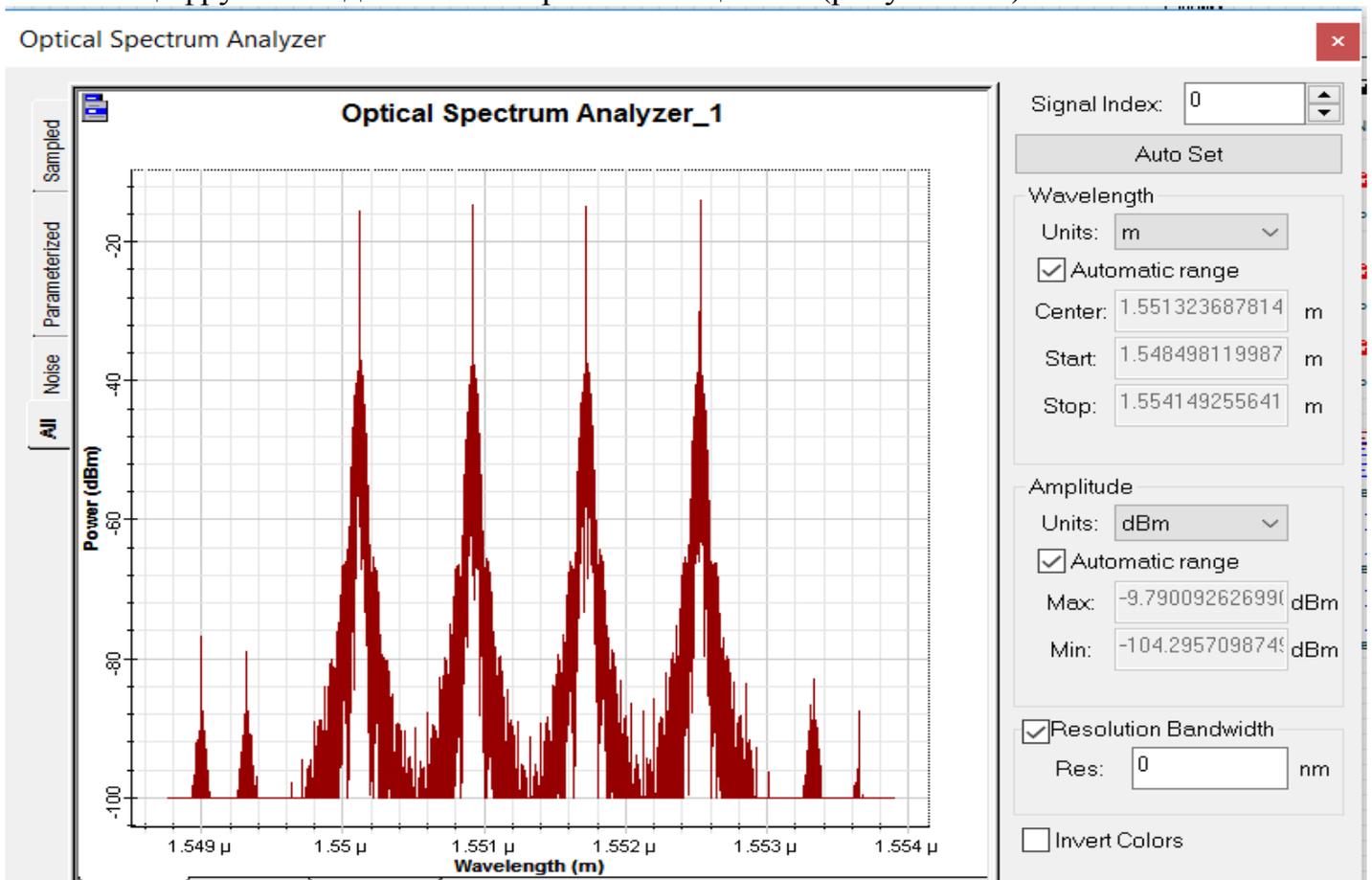


Рисунок 5.6 - Спектр анализ на выходе из линии при 25 км 0,19дБ/км



Рисунок 5.7 – Мощность сигнала после прохождения WDM элемента (Demux1x4)

По рисунку 5.7 можно наблюдать так же изменение в мощности, так как сигнал прошел WDM элемент который вносит свое номинальное затухание. В нашем случае, это 6.5 dB у демультиплексора. Обычно, на практике демультиплексоры вносят приблизительно от 6 dB до 6.8 dB (в зависимости от типа демультиплексора). Используя эти данные, можем произвести расчет мощности, то есть, посмотреть, как он изменился после прохождения через цепь элементов.

$$P_{out} = -4.6 - 6.5 = -10.9$$

Исходя из расчета можем уверенно сказать, что есть соответствие со значением оптического измерителя, который показан на рисунке 5.7.

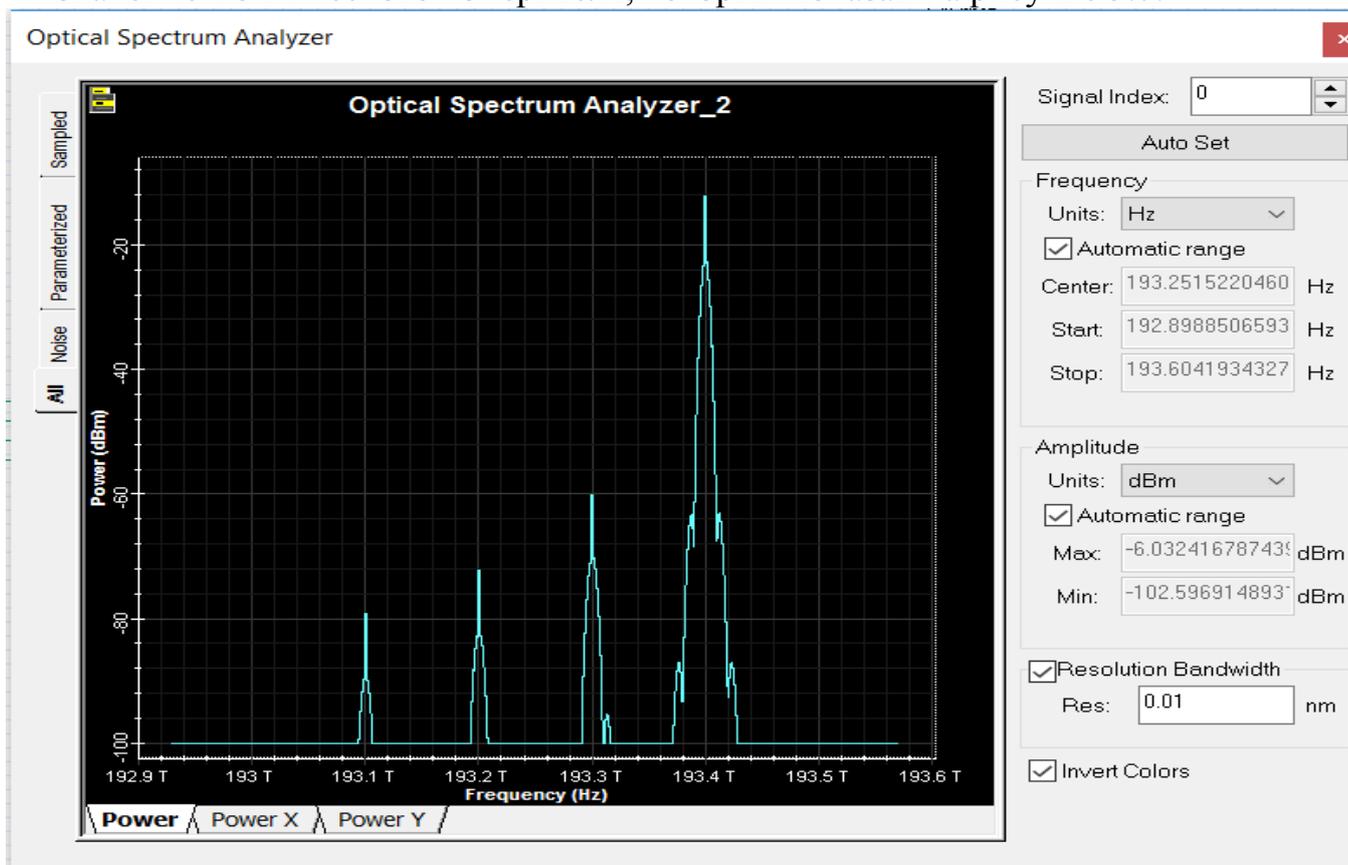


Рисунок 5.8 - Спектральный анализ после прохождения WDM элемента(демух 1x4)

Анализатор спектра позволяет определить амплитуду и частоту спектральных компонентов, входящих в состав анализируемого процесса. Важнейшей его характеристикой является разрешающая способность: наименьший интервал по частоте между двумя спектральными линиями, которые ещё разделяются анализатором спектра. Анализатор спектра может дать истинный спектр только тогда, когда анализируемое колебание  $x(t)$  периодически, либо существует только в пределах интервала  $T$ . При анализе длительностей процессов анализатор спектра даёт не истинный спектр.

При оценке полосы пропускания волоконно-оптического канала обычно предполагается, что для каждой полосы пропускания 1 Гбит / с требуется 2 ТГц. При таком подходе 60 ТГц становится эквивалентным полосе пропускания 30 Тбит / с, но ограничения передающего оборудования, которое формирует канал данных, не принимаются во внимание. Если, например, время отклика фотоприемника составляет 1 нс, то скорость передачи трафика по каналу не будет превышать 1 Гбит / с независимо от ширины полосы пропускания волокна.

Ширина полосы канала определяется такими характеристиками приемопередатчиков, как максимально достижимая частота модуляции передатчика и способность фотоприемника быстро и точно распознавать биты

данных.

Благодаря WDM можно организовать двусторонний многоканальный трафик по одному волокну (в обычных линиях используется пара волокон - для передачи в прямом и обратном направлениях).

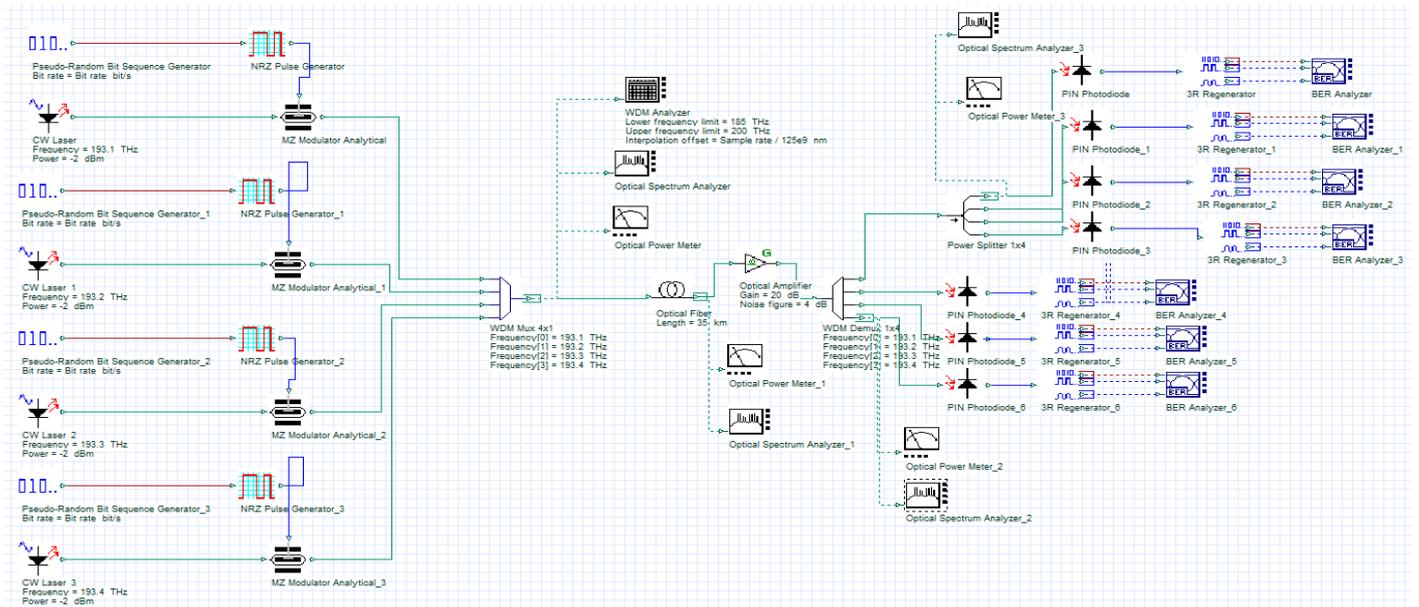


Рисунок 5а – Схема линии с использованием усилителя

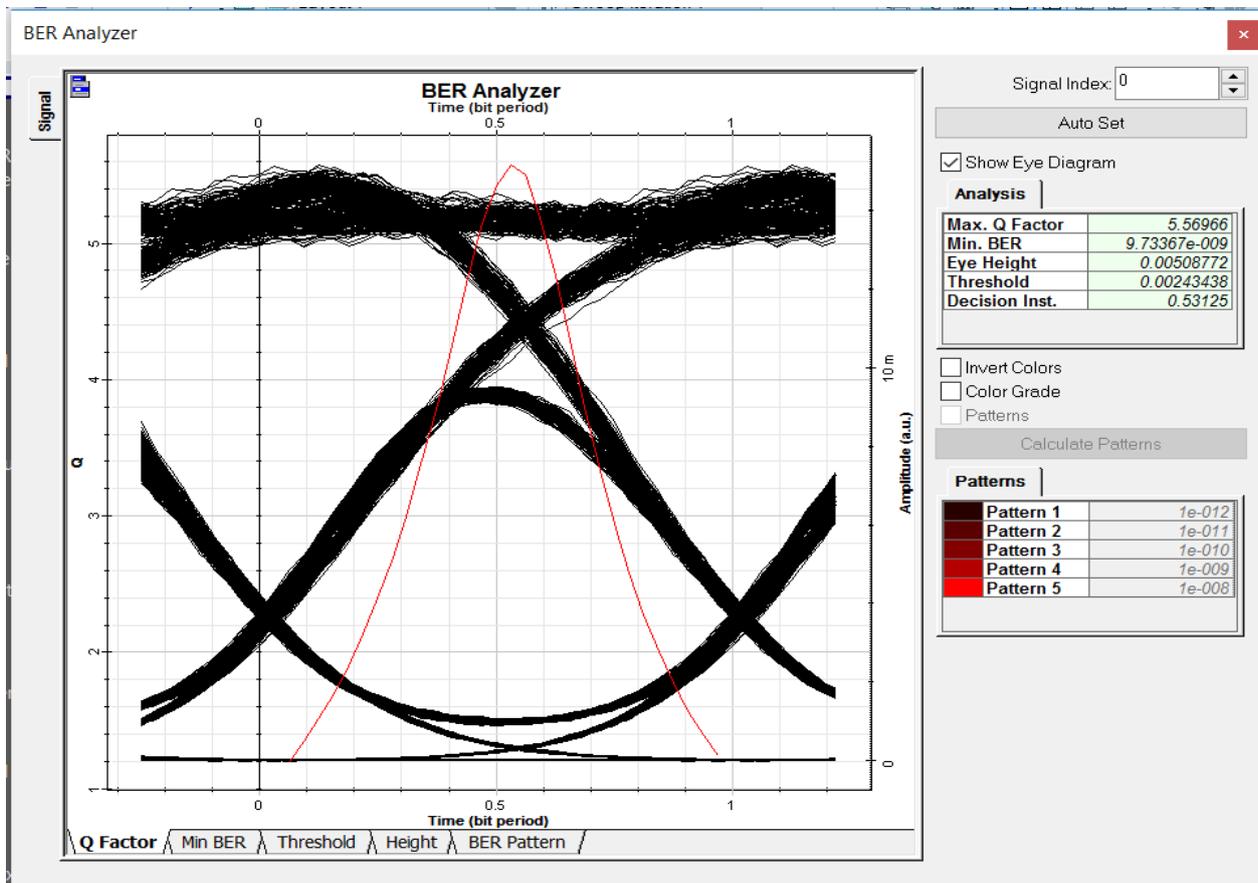


Рис 5.1 – Спектр сигнала с использованием усилителя

После усилителя сигнал видно, что шума стало меньше, показатели BER и Q-factor в требуемом диапазоне.

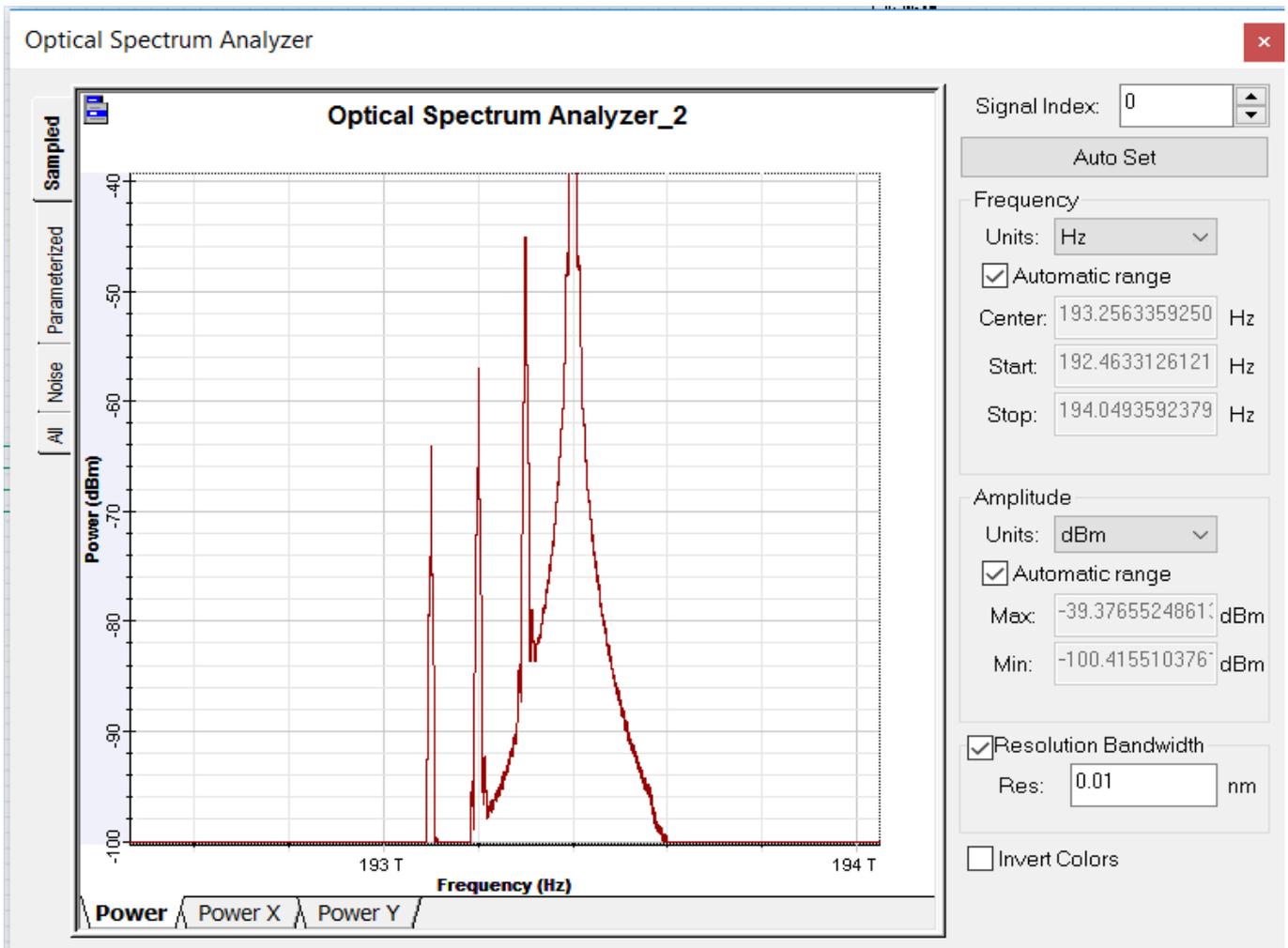


Рис 5.8а – Анализ спектра после использования усилителя OBU



Рис 5.8 б – Мощность после прохождения сплиттера 1x4

По рисунку 5.8б мы можем видеть, что сигнал подвергся затуханию после прохождения разветвителя 1x4. По номинальным значениям сплиттер 1x4 дает затухание на 6 дБ, поэтому можно произвести наглядный расчет.

Сигнал, который прошел по линии имеет значение -10.8 дБм (рисунок 5.7)

$$A = -10,8 \text{ дБм} - 6 \text{ дБм} = -16,8 \text{ дБм.}$$

Как видим из рисунка 5.8б, есть соответствие (~-16,932 дБм)

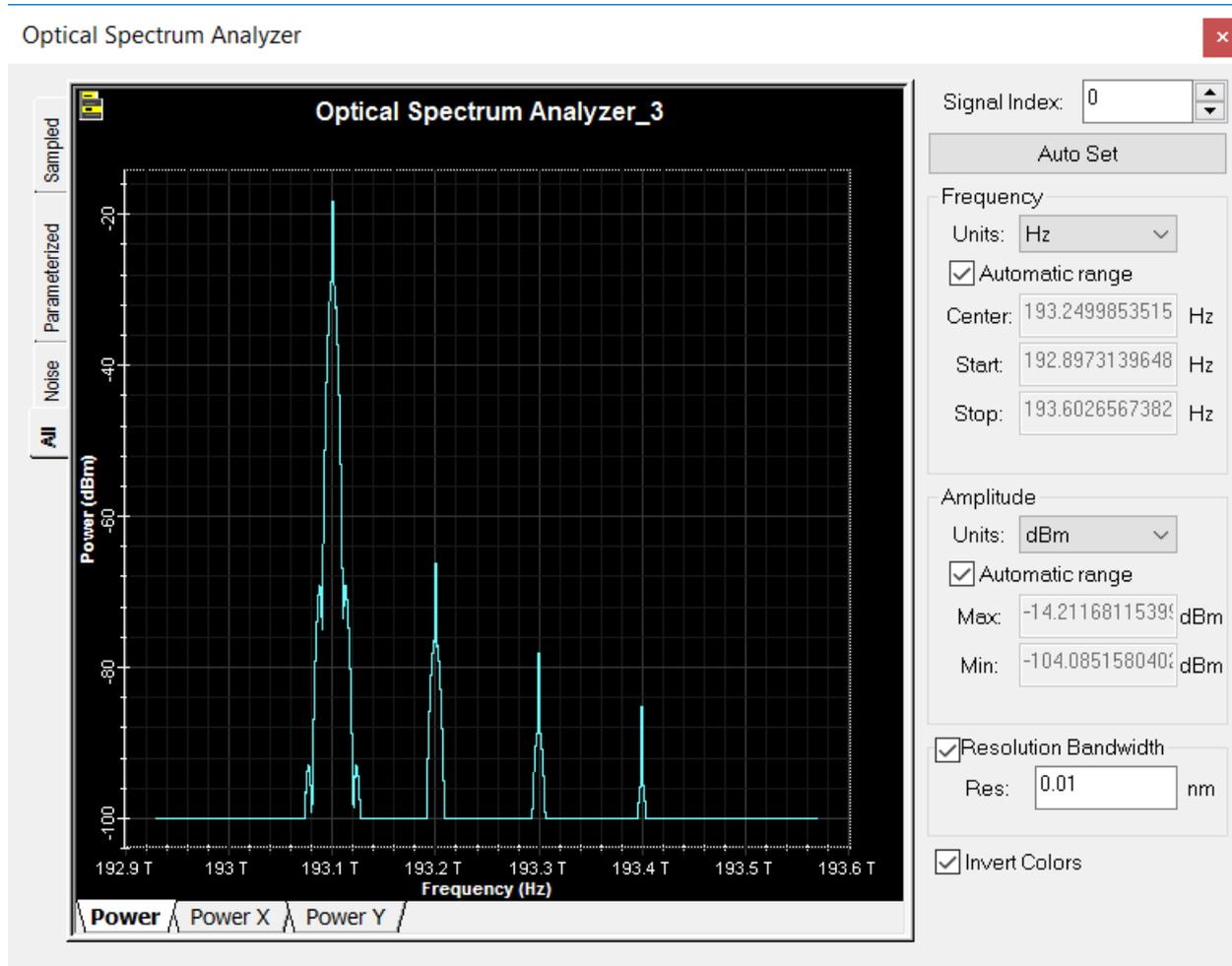


Рис 5.9 – Спектр анализ после сплиттера 1x4

Исходя из анализа спектра (рис 5.9), наблюдаем что длина волны 193.1 имеет больший всплеск спектра нежели остальные длины волн. Это происходит потому что мы подали эту длину волны через сплиттер 1x4 (рис 5)

Надежность передачи данных характеризует вероятность искажения передаваемого бита данных. Этот индикатор часто называют частотой битовых ошибок (BER). Значение BER для каналов связи без дополнительных средств защиты от ошибок составляет 10-4-10-6, в волокне-10-9. Значение BER до 10-4 говорит о том, что в среднем 10 000 бит искажается на однобитовое значение. Искажения бит происходят как из-за наличия помех на линии и из-за искажений формы сигнала ограниченной полосой пропускания линии. Для повышения достоверности передаваемых данных, необходимо повысить степень помехозащищенности линии, снизить уровень перекрестных наводок в кабеле, а также использовать более широкополосные

линии связи.

BER является мерой качества передающего устройства, приемника, пути передачи и его среды, поскольку он учитывает такие факторы, как шум, дрожание, затухание, затухание и любые схемы обнаружения и исправления ошибок, используемые в стандарте интерфейса. BER измеряется путем применения псевдослучайного непрерывного потока битов NRZ к интерфейсу, подсчета ошибок по битам и сравнения переданных с полученными данными с последующим вычислением отношения.

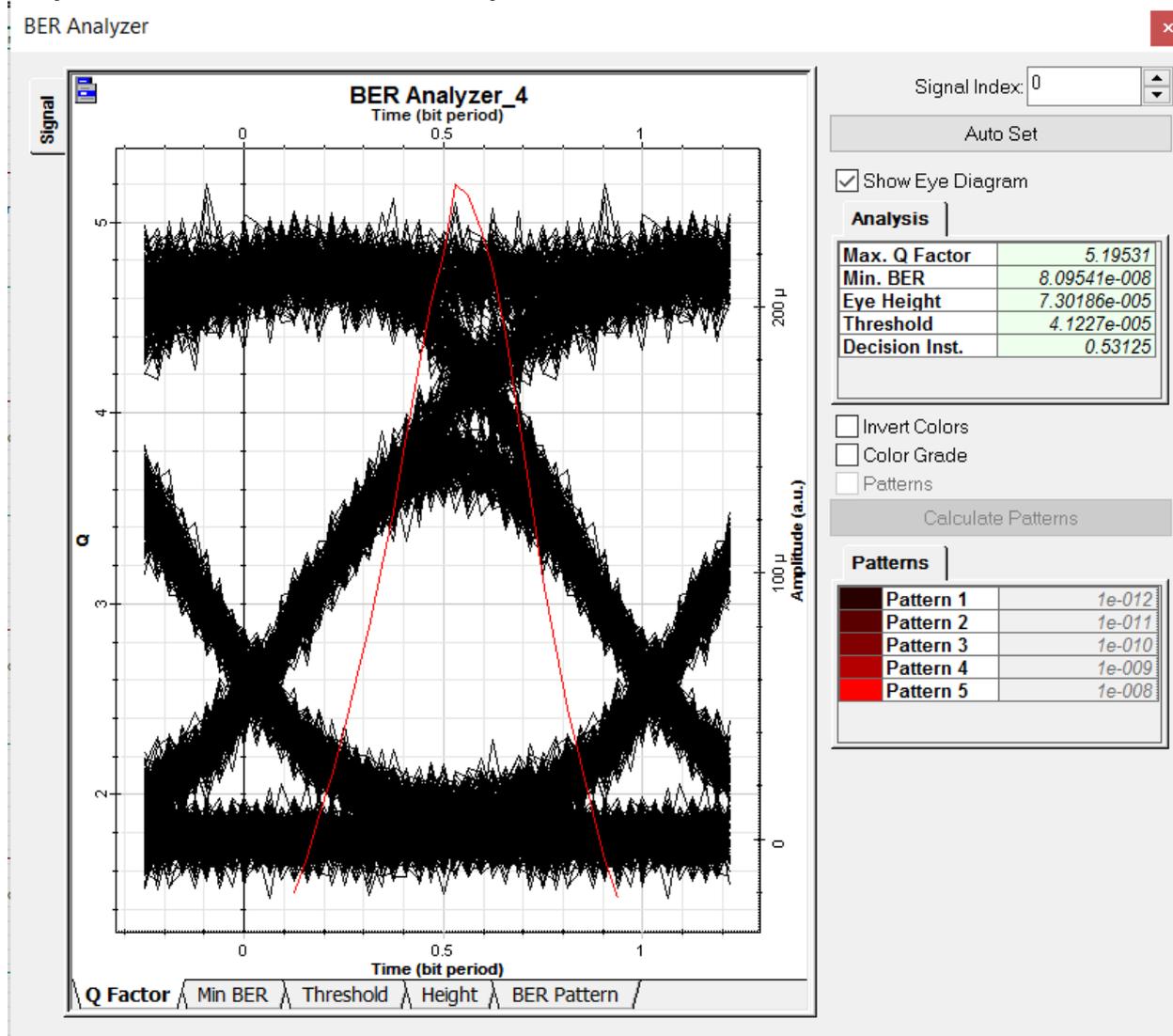


Рис 5.10 – Глаз-диаграмма PIN4

По данной глаз-диаграмме наблюдаются незначительные шумы, при этом  $BER=8.09e-008$  и  $Q$ -фактор = 5.193, что является сигналом с хорошим качеством, на практике  $Q$ -factor со значениями от 4 до 12 принимаются как «хороший» сигнал. Для чистоты эксперимента используем усилитель на линии. Результат будет указан ниже. Однако для таких ЦСП довольно сложно проводить прямые измерения BER (например, с использованием анализатора канала или измерителя частоты ошибок) из-за затрат времени.

Например, регистрация 10-битных ошибок для получения BER порядка

10-15 при скорости передачи STM-64 (10 Гбит / с) потребует измерений в течение 28 часов  $\{(1015/1010) = 105 \text{ с}, 105 / 60/60 = 27,7\}$ .

Сигнал на приемнике после включения в линию усилителя, сигнал стал заметно лучше, шумов стало меньше (рис.5.11а).

Q-фактор - это параметр, который напрямую отражает качество сигнала цифровой системы передачи. Существует определенная функциональная зависимость добротности сигнала и измеренной частоты ошибок BER.

Добротность определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрическом уровне, а именно, непосредственно из глаз-диаграммы (рисунок 5.11).

В этом случае строится функция распределения состояний «1» и «0», и для этих распределений, принимая их гауссову форму, ожидаемые значения состояний E1 и E0 и их стандартные отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  равны по оценкам.

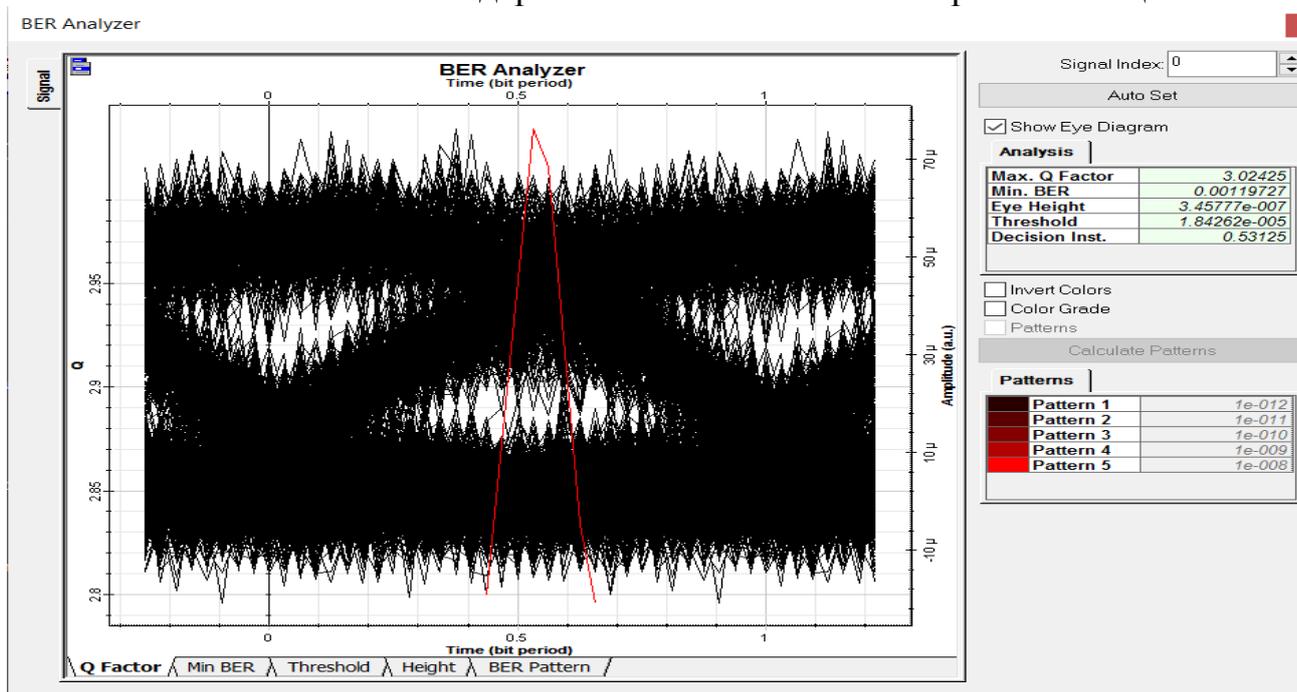


Рис 5.11 – Глаз-диаграмма PIN (после прохождения сплиттера)

Допустимые значения для цифровых систем определяются исходя из предположения, что потери в видео, звуке или потоке данных не должно быть заметно получателю. Зависимость между источником и приемником, в то время как телевизионное вещание или передача видео должно передаваться в реальном времени с практически постоянной задержки между источником и приемником.

Оптический передатчик шума, генерируемого лазером из-за спонтанного испускания фотонов, что приводит к когерентности светового потока. Эти шумы характеризуются относительной интенсивностью шума - RIN (шум относительной интенсивности). Следует отметить, что любое увеличение или уменьшение уровня входного сигнала оптического передатчика в линию на 1 дБ вызывает увеличение или уменьшение индекса канальной оптической модуляции на 0,5 дБ и, как следствие, увеличение

(уменьшение)  $C / N$  на выходе оптического приемника также на 1 дБ (при постоянном уровне входной оптической мощности).

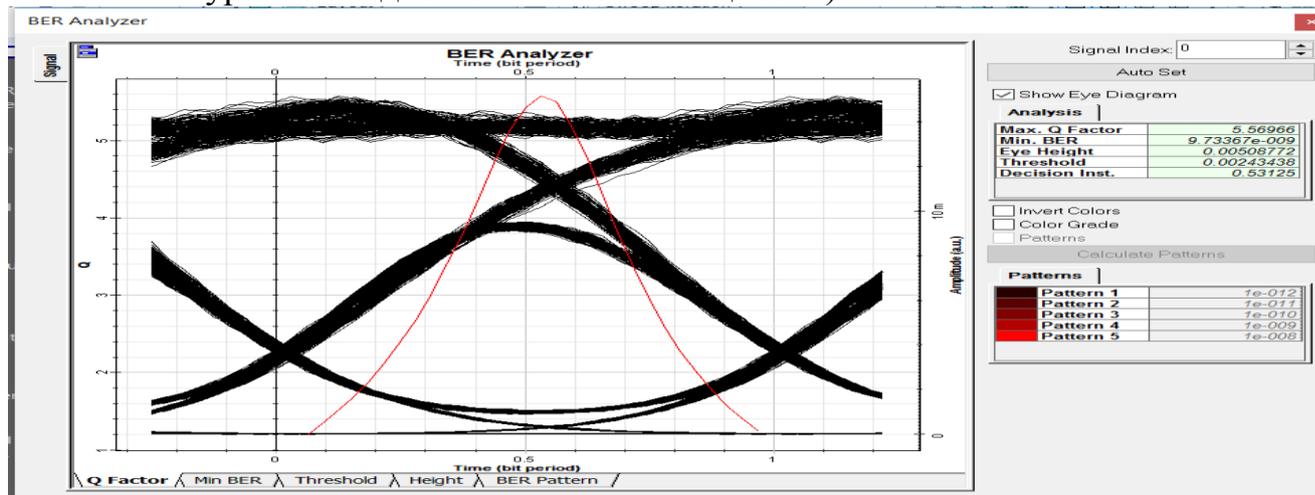


Рис 5.11а – глаз-диаграмма PIN после усилителя

Ниже приведены такие же сравнительные глаз-диаграммы, на которых наблюдается улучшение сигнала с использованием оптического усилителя.

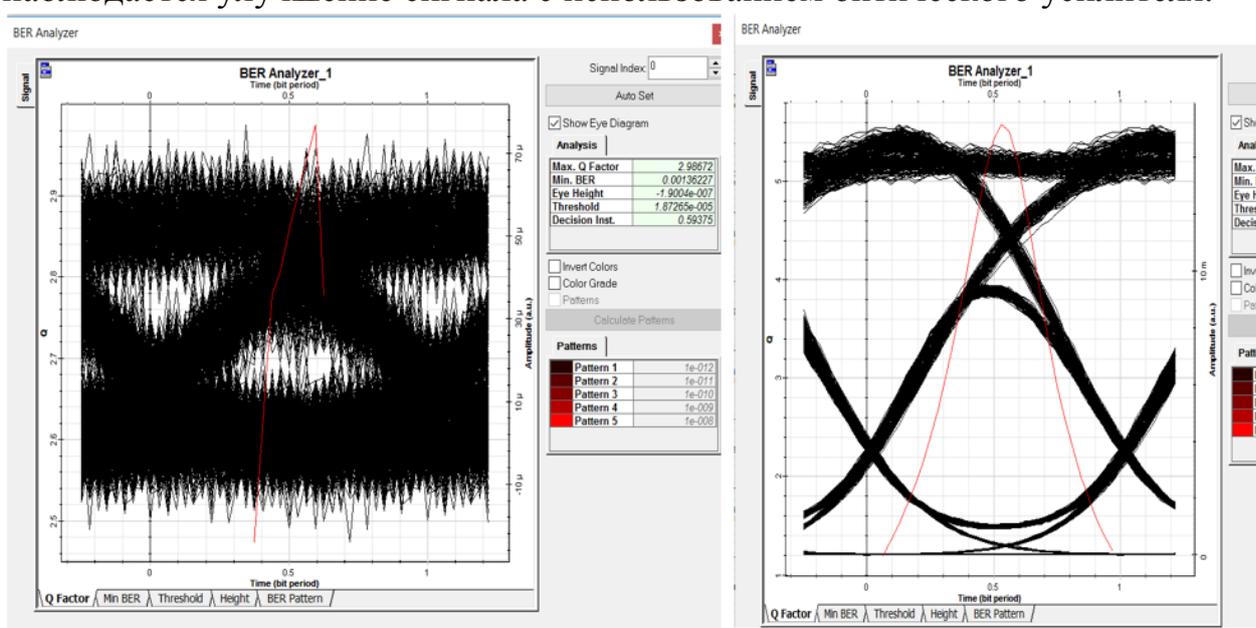


Рис 5.12 – Амплитудный спектр одностороннего экспоненциального импульса

Чтобы проанализировать прохождение таких сигналов через схему, они действуют следующим образом: они представляют сложный сигнал в виде суммы гармонических колебаний и, используя известный метод (например, метод комплексной амплитуды), анализируют прохождение каждой гармоники через схему. В соответствии с принципом суперпозиции форма исходного сигнала определяется как сумма исходных гармоник.

Представление сложного сигнала в форме гармонических колебаний обусловлено тем фактом, что гармонический сигнал является единственным сигналом, который при прохождении через цепь не меняет свою форму. Только его амплитуда и начальное изменение фазы, что значительно

упрощает анализ прохождения сложных сигналов. Амплитудный спектр представляет собой частотное распределение амплитуд гармонических составляющих.

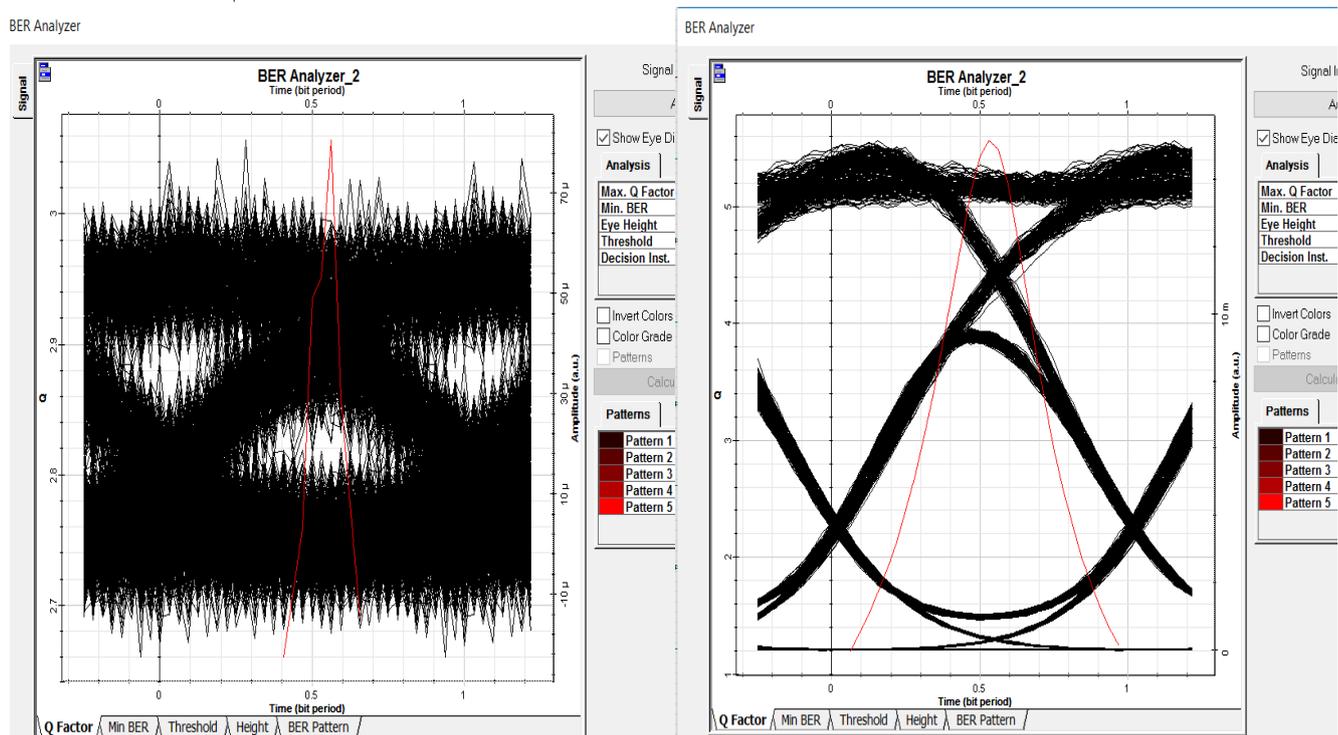


Рис 5.12 – Глаз-диаграмма PIN1 до и после усилителя

Область («открытие») глазных диаграмм хорошо видна, в пределах которой должна выполняться операция идентификации сигнала для каждого из двух уровней решения. Горизонтальные линии, обозначенные как -1, 0 и +1, соответствуют амплитудам импульсов при отсутствии помех, а вертикальные линии после каждого тактового интервала  $T$  представляют идеальные моменты решения.

Коэффициент ошибок по битам (BER) является основным показателем для измерения качества передачи. Из-за таких факторов, как шум, нелинейные эффекты и дисперсия (PMD / CD), оптические сигналы, связанные с волокнами, будут искажаться, когда оптические сигналы поступают в конец волоконно-оптических линий. Следовательно, битовые ошибки присутствуют, когда приемник преобразует оптические сигналы в электрические сигналы. Частота ошибок в битах является мерой эффективности линии передачи данных. BER определяется путем присоединения специальных тестирующих приборов к передатчику и приемнику, после чего передатчик посылает через систему волоконно-оптической связи псевдослучайный набор битов и измеряет число неверных битов на выходе из приемника (прибор измерения частоты ошибок, присоединенный к приемнику, содержит тот же код псевдослучайного набора битов. С теоретической точки зрения для систем WDM не имеет значения, какие методы используются для кодирования и генерирования конкретного цифрового сигнала. На практике эти системы, как правило, передают один и тот же тип трафика, что диктуется используемым

методом синхронизации и требованием единообразия процесса обработки. В отличие от систем SDH, транспортируемый сигнал здесь не упаковывается в контейнеры и не обрабатывается в соответствии со структурой мультиплексирования SDH для формирования транспортного модуля STM-N, который может передаваться только через физический уровень в канал связи.

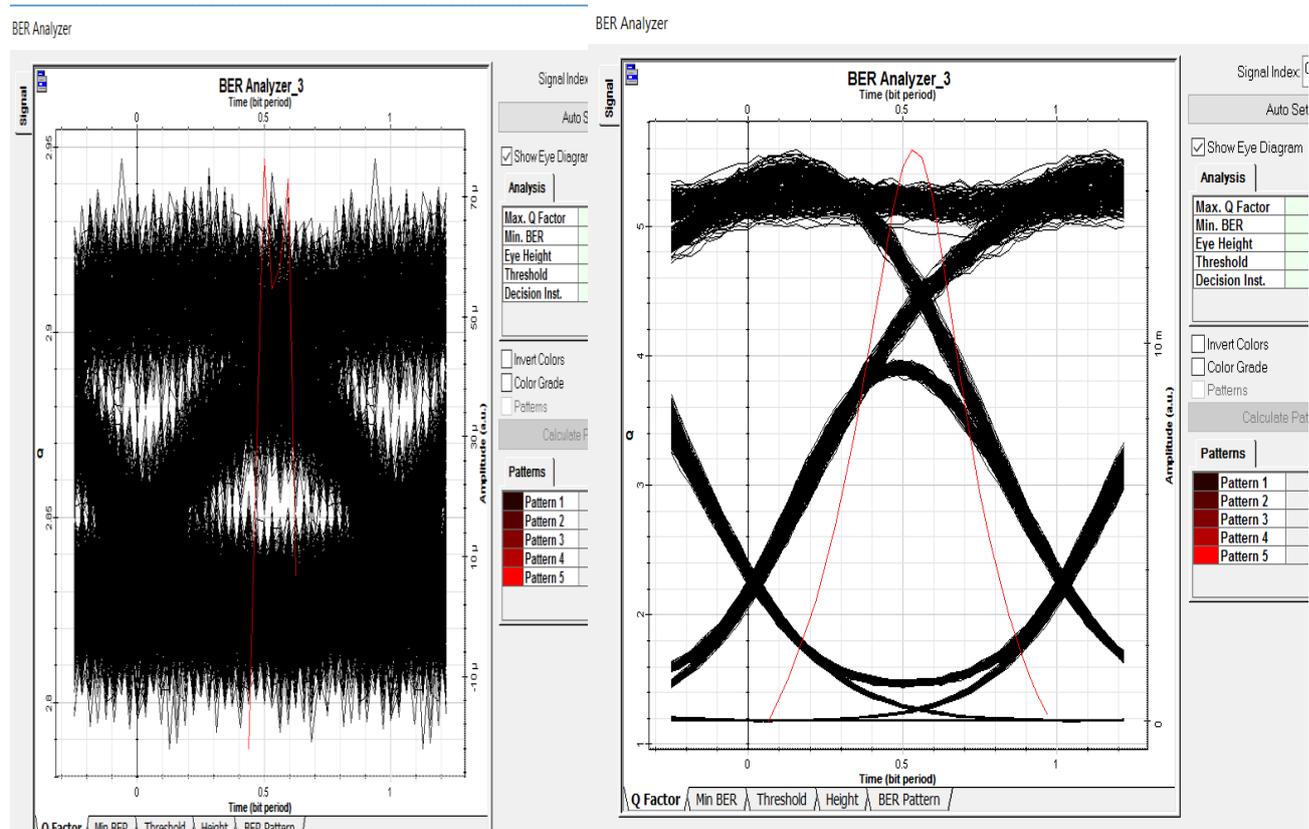


Рис. 5.13 – Глаз-диаграмма PIN3 до и после усилителя

Совокупность всех гармонических составляющих негармонического сигнала называют спектром этого сигнала. Различают фазовый и амплитудный спектр сигнала:

фазовый спектр сигнала – совокупность начальных фаз всех гармоник

амплитудный спектр сигнала – амплитуды всех гармоник, из которых складывается негармонический сигнал.

Давайте рассмотрим амплитудный спектр подробнее. Для визуального изображения спектра используют диаграммы, представляющие из себя набор вертикальных линий определенной длины (длина зависит от амплитуды сигналов). На горизонтальной оси диаграммы откладываются частоты гармоник. По горизонтальной оси могут откладываться как частоты в Гц, так и просто номера гармоник, как в данном случае. А по вертикальной оси – амплитуды гармоник. Давайте построим амплитудный спектр сигнала для негармонического колебания.

АЧХ является важнейшей характеристикой многих цепей и устройств – фильтров, усилителей звука и т. д. Даже простые наушники имеют свою собственную амплитудно-частотную характеристику. АЧХ – это зависимость

амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала. Негармонический периодический сигнал можно разложить в ряд Фурье. Но нас сейчас интересует, в первую очередь, аудио-сигнал, и выглядит он следующим образом:

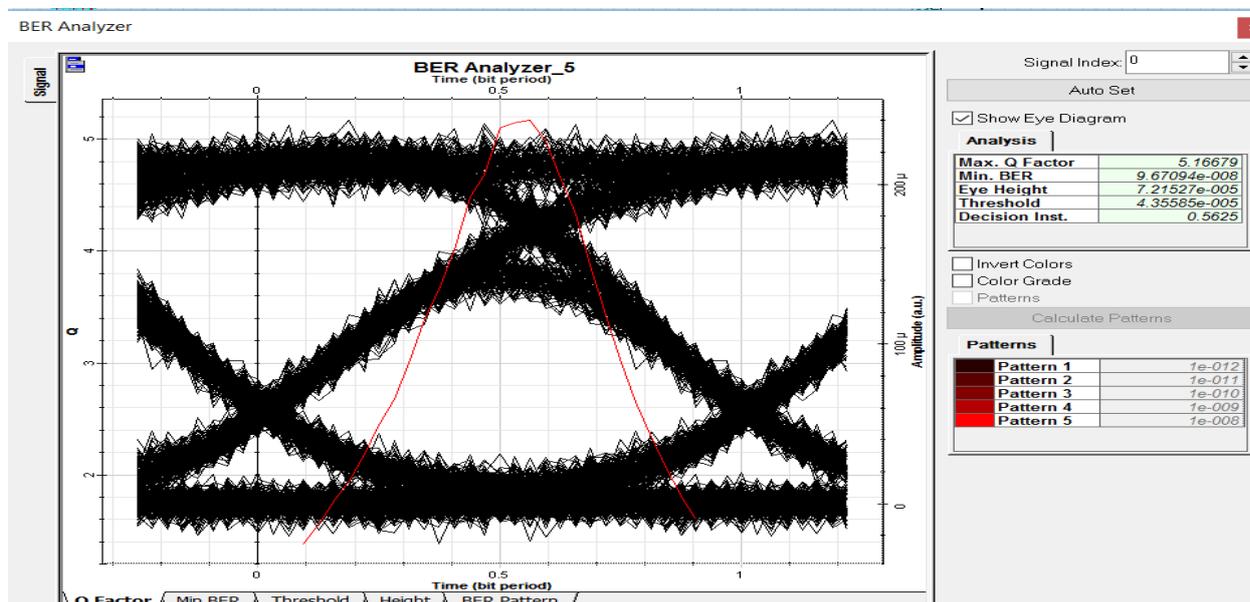


Рис 5.14 – Амплитудный спектр одностороннего экспоненциального импульса

Наблюдаем что, ни о какой периодичности здесь не может идти и речи. Но, существуют определенные алгоритмы, с помощью которых позволяют представить звуковой сигнал в виде спектра входящих в него частот. Соответственно, мы можем построить диаграмму амплитудного спектра звукового сигнала. А пройдя через какую-либо цепь (к примеру, через наушники при воспроизведении звука) сигнал будет изменен. Так вот амплитудно-частотная характеристика как раз и показывает, какие изменения будет претерпевать входной сигнал при прохождении через ту или иную цепь. Точно так же после прохождения через усилитель данный сигнал подвергается изменению как мы можем увидеть на рисунке ниже (рис 5.15). Такие явления обусловлены нелинейным откликом вещества на увеличение интенсивности светового потока. В результате оптические характеристики среды (электронная поляризуемость, показатель преломления, коэффициент поглощения) становятся функциями электрического поля световой волны, так что поляризация среды начинает нелинейно зависеть от напряженности поля, а распространения волны с разными частотами и направлениями влияют друг на друга.

Нелинейные явления в оптическом волокне усиливаются с увеличением напряженности поля, то есть скорости потока на единицу площади поперечного сечения сердцевинки волокна. Чтобы увеличить дальность и скорость передачи, они стремятся уменьшить накопленную дисперсию кабеля; поэтому используется одномодовое волокно с небольшим диаметром

сердечника (10 мкм или менее). Однако использование одномодовой несущей, а также низкие оптические потери могут привести к появлению высокой плотности потока излучения на довольно длинных участках. Анализируя технологию WDM-PON следует обратить внимание на такие явления как нелинейное преломление, вынужденное рассеяние света и четырехволновое смешение.

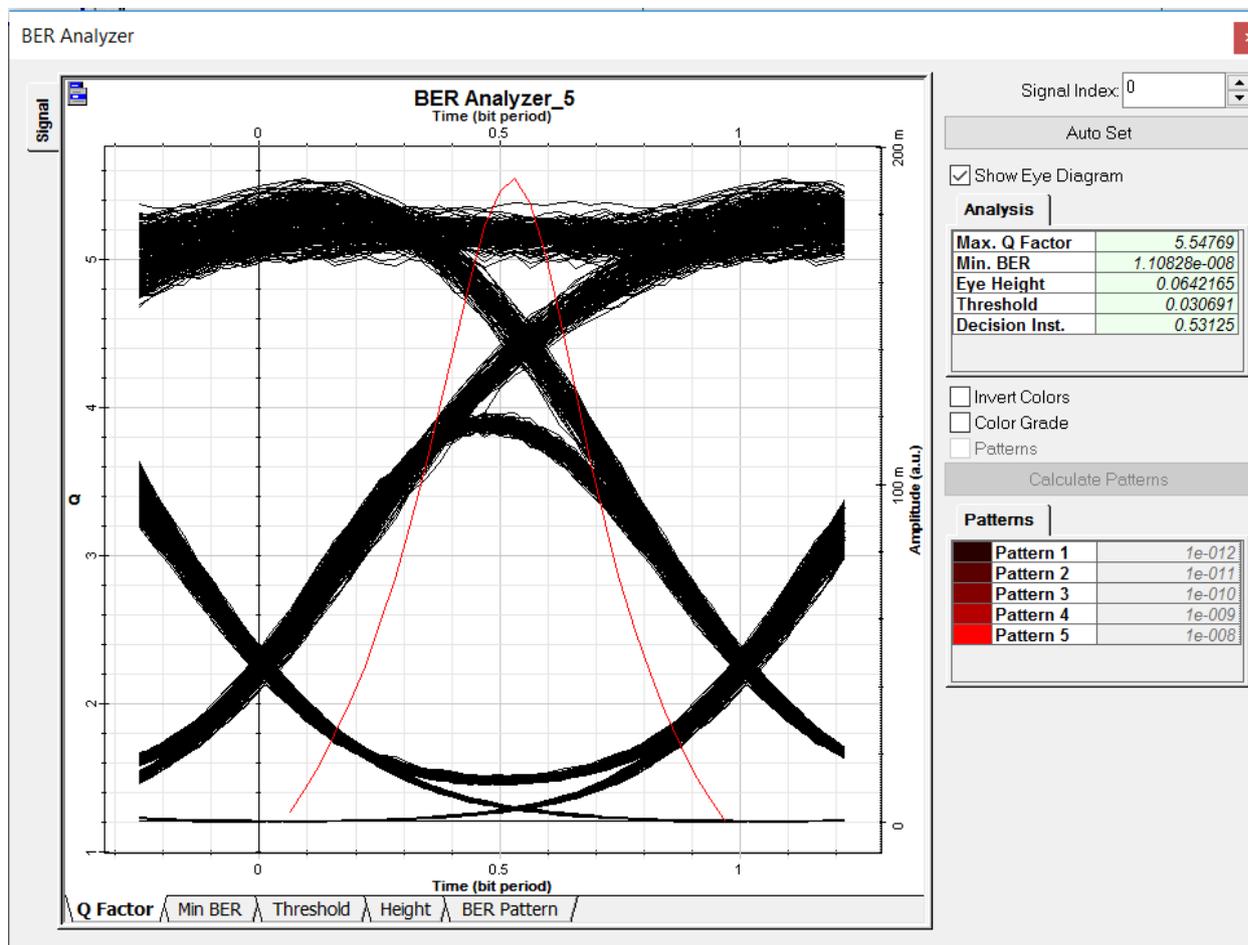


Рис 5.15 – Сигнал после прохождения через усилитель

Генератор тестера BER генерирует тестовые сигналы, которые поступают на тестовый объект. Генератор тестового сигнала также является источником для детектора ошибок тестера BER. Объект тестирования может быть географически объединен с тестером BER или расположен в удаленном месте. В любом случае тестовый объект должен быть выведен из эксплуатации, а сигнал с его выхода подается на вход приемника тестера BER.

Детектор ошибок получает тестовый сигнал с выхода тестового объекта или генерирует точную копию этого сигнала в автономном режиме. Тестовый сигнал генератора сравнивается побитно с сигналом с выхода тестового объекта. Детектор обнаруживает каждую разницу сигналов как битовую ошибку.

Необходимая синфазная природа этих двух сигналов обеспечивается детектором ошибок, в котором обеспечивается требуемая задержка сигнала с

выхода генератора. Задача фазирования сигналов обычно выполняется на этапе калибровки тестера BER.

Испытательные сигналы тестеров BER стандартизированы. Как отмечено выше, информационный сигнал в тестерах BER моделируется в виде так называемых псевдослучайных последовательностей PRBS (PRBS), они формируются в соответствии со стандартными алгоритмами и отличаются количеством генерируемых символов  $M = 2^k - 1$ , где  $k$  - целое число

Генераторы тестеров BER предоставляют возможность создавать произвольные тестовые последовательности, обычно называемые кодовыми словами.

Кроме того, параметр BER подходит для оценки влияния одиночных помех, вызванных Гауссовскими процессами, такими как внутренние и перекрестные помехи. В то же время в любой реальной системе связи существуют целые пакеты таких ошибок (их также называют последовательными ошибками). Поэтому, не зная временную структуру ошибок системы связи, невозможно эффективно локализовать повреждения и накапливать адекватную информацию о качестве проектирования и монтажа оборудования. Фактически, одного параметра BER недостаточно для правильной оценки производительности DSP.

Шум передатчика генерируется лазером из-за спонтанного излучения фотонов, что приводит к когерентности светового потока. Эти шумы характеризуются относительной интенсивностью шума - RIN (шум относительной интенсивности). Другими словами, это мощность шума, измеренная в диапазоне 1 Гц относительно мощности излучаемого квазикогерентного светового потока. Отношение оптического сигнала к шуму (OSNR) используется для количественной оценки степени помех оптического шума на оптических сигналах. Это отношение мощности служебного сигнала к мощности шума в допустимой полосе пропускания.

$$\text{OSNR (дБ)} = 10 \lg P_i / N_i + 10 \lg B_m / B_r,$$

В формуле:

$P_i$  - мощность сигнала на канале  $i$ ;

$B_m$  - эквивалентная ширина полосы шума;

$N_i$  - мощность шума, вводимая в  $B_m$ ;

$B_r$  - эталонная оптическая ширина полосы, которая составляет 0,1 нм.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)
1.5525244e-009	7.1308643	-33.201833	40.332697
1.5517208e-009	7.1394742	-33.176991	40.316465
1.550918e-009	7.1330003	-33.190431	40.323431
1.5501161e-009	7.1316632	-30.093696	37.225359
1.549315e-009	7.1388697	-30.18859	37.327459
1.5485148e-009	7.1307641	-33.20202	40.332784
1.5477153e-009	7.1317439	-33.185555	40.317299
1.5469167e-009	7.1309905	-33.189758	40.320749

Рис. 6 – Значения сигнал/шум на линии где использованы сплиттеры 1x8

OSNR – это очень удобный способ количественной оценки чувствительности приемника, но существуют некоторые моменты, которые следует учитывать при интерпретации и измерения отношения сигнал/шум. Усилители способны усиливать сигнал любого формата и одновременно восстанавливать большое число независимых спектрально разделенных каналов. В то же время, обеспечивая усиление мощности передаваемого оптического сигнала, накапливают искажения, которые возникают на различных участках сети. Такие искажения приводят к снижению соотношения сигнал/шум (OSNR) на приемной стороне системы. На этапе проектирования сети предусматривается такой исходный запас помехоустойчивости для каждого канала, который позволил бы обеспечить требуемую помехозащищенность сигнала в конце линии.

### 3. Оценочный расчет для физического уровня WDM-PON

#### 3.1 Расчет дисперсионных и энергетических характеристик

Допустимый уровень мощности оптических каналов DWDM на групповом участке магистрали между OLT и LE (Local Exchange) не должен превышать +17 дБм (50 мВт) для волокна стандарта G.652 в спектре волн 1530-1565 нм (диапазон C) или 1565-1625 нм (диапазон L) по причинам искажений оптических сигналов, снижения мощности и образования шумов, вызываемых нелинейными эффектами протяженного волокна (по рекомендации ITU-T G.663/2011). При организации спектральных каналов допустимый уровень мощности для каждого канала  $P_{\text{кан}i}$  после демультиплексора WDM не превысит (по рекомендации ITU-T G.692/1998) величины [75]:

$$P_{chMPI-S} = P_{max MPI-S} - 10 \lg N, \quad (7.1)$$

Где  $P_{chMPI-S}$  – допустимый уровень мощности для каждого канала;

$P_{max MPI-S}$  – максимальный уровень мощности (<17dB);

N – число каналов.

$$P_{chMPI-S} = 17 - 10 \lg 40 = 0,98 \text{ дБм,}$$

$$P_{chMPI-S} = 17 - 10 \lg 64 = -1,06 \text{ дБм.}$$

Для 40 каналов уровень мощности одного канала не превысил +1 дБм. С учетом потерь мощности в демультиплексоре WDM (около 2 дБ) [75], тогда:

$$\begin{aligned} P_{chMPI-S} &= 0,98 - 2 = -1,02 \text{ дБм}, \\ P_{chMPI-S} &= -1,06 - 2 = -3,06 \text{ дБм}. \end{aligned}$$

Этот сигнальный канал делится на 4:16:16, что составит общий коэффициент деления 1024 предусматриваемый в сети большого радиуса действия

$$\alpha_{разв. \text{ бц}} = \sum \alpha_{разв}, \quad (7.2)$$

где  $\alpha_{разв}$  – энергетические потери в планарных сплиттерах приведены в [75].

$$\alpha_{разв. \text{ бц}} = 7,4 + 13,9 + 13,9 = 35,2 \text{ дБ}.$$

С учетом дистанции размещения терминалов ONT до 10 км потери в волоконных световодах могут достигнуть:

$$A = L \cdot \alpha_s + N_p \cdot A_p + N_c \cdot A_c, \quad (7.3)$$

Где  $L$  – дистанции размещения терминалов ONT;

$\alpha_s$  – коэффициент затухания волокна в кабельной линии (при длине волны 1550 нм взято 0,27 дБ/км);

$A_c$  – средние потери в сварном соединении (0,05 дБ);

$N_c$  – количество сварных соединений;

$A_p$  – средние потери в разъемном соединении (0,2дБ),

$N_p$  – число разъемных соединений 4.

Число сварных стыков волокон меньше на единицу количества строительных длин кабеля (в расчете принята равной 4 км). Разделив дистанцию размещения терминалов ONT на строительную длину кабеля, получим две строительных длины по 4 км и одну 2 км. Соответственно число мест сращивания в линии равно 2.

$$A = 10 \cdot 0,27 + 4 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 = 3,6 \text{ дБ}.$$

Таким образом, потребовалось бы применение оптического приемника с чувствительностью не хуже:

$$\begin{aligned} P_{PP. \text{ex}} &= P_{chMPI-S} - \alpha_{разв. \text{ бц}} - A. \quad (7.4) \\ P_{PP. \text{ex}(40)} &= -1,02 - 35,2 - 3,6 = -39,82 \text{ дБм}, \\ P_{PP. \text{ex}(64)} &= -3,06 - 35,2 - 3,6 = -41,86 \text{ дБм}. \end{aligned}$$

Сокращение количества спектральных каналов и увеличение мощности каждого из них, или использование дополнительного оптического усиления с использованием оптических усилителей SOA в каждом ONT позволит вам достичь необходимого энергетического потенциала.

Также возможно мультиплексировать большое количество спектральных каналов, заменив пассивные делители оптической мощности 1: n оптическими фильтрами AWG (Arrayed Waveguide Grating) на волноводную решетку для разделения волн, что значительно снижает влияние передаваемой мощности. оптические сигналы. Потери в планарном фильтре AWG (демультиплексоре) волн 1:32, как правило, не превышают 6 дБ [75]. Это важно для длинных линий с ограниченным бюджетом оптической мощности.

Можно рассчитать максимальную длину пролета, обеспеченную мощностью передатчика и чувствительностью приемника. Для этого необходимо рассчитать энергетический потенциал  $P_{opt}$  дБ

Используем формулу:

$$P_{opt} = P_{trans} - P_{rec}, \quad (7.5)$$

Где  $P_{trans}$  – уровень сигнала на выходе передатчика, дБм;

$P_{rec}$  – уровень сигнала на входе приемника, дБм.

Таблица 7.1 – Оптические характеристики оборудования OSN 8800

Параметр	Значение
Линейный интерфейс, скорость передачи в линии / нагрузка	OUT, 120 / 103 Гбит/с
Выходная мощность	-7...0 дБм
Диапазон рабочих длин волн передатчика	1528,7 – 1567,1 нм
Чувствительность приемника (BER=10 <sup>-12</sup> )	-18 дБм
Перегрузка приемника (BER=10 <sup>-12</sup> )	0 дБм
OSNR <sub>T</sub> (0,1 нм, BER=10 <sup>-12</sup> )	12,5 дБ

$$P_{opt} = 0 - (-18) = 18 \text{ дБм.}$$

Максимальная длина пролета:  $L_{max} = P_{opt} / \alpha = 18 / 0.19 = 94.7 \text{ км}$

$\alpha$  – коэффициент затухания волокна (0.19 дБ/км)

Таким образом, с увеличением количества каналов (уменьшением мощности сигнала в одном оптическом канале) расстояние передачи уменьшается.

Рассмотрим, например, расстояние 25/35/40 км с использованием усилителя оптического сигнала.

Оптический путь содержит поперечное сечение - расстояние между двумя терминалами (регенерация) и промежутки между терминал и усилитель (секция усиления). Нет усилителей. Размещая оптические усилители в секции, мы должны стремиться к тому, чтобы ослабление всех полос было одинаковым и компенсировалось одним усилением.

В соответствии с рекомендацией SES-92 G.692 рабочее значение OSNR на интерфейсе MPI-R во время передачи в каждом канале должно составлять не менее 12,5 дБ, как используется FEC [43]. Рассчитаем затухание на пролетах с разным расстоянием.

$$\text{При } L = 25 \text{ км } A = 25 * 0.19 = 4.75 \text{ дБ,}$$

$$\text{При } L = 35 \text{ км } A = 35 * 0.19 = 6.65 \text{ дБ,}$$

$$\text{При } L = 40 \text{ км } A = 40 * 0.19 = 7.16 \text{ дБ.}$$

Мы рассчитываем отношение оптического сигнала к шуму (OSNR) и сравниваем его со стандартом. Отношение оптического сигнала к шуму рассчитывается на интерфейсе MPI-R для одного N-канального канала S-WDM.

Чтобы вычислить OSNR, мы сначала вычисляем средний сигнал и уровень сигнала на интерфейсе MPI-S.

Средняя мощность канала на выходе усилителя (на интерфейсе MPI-S) будет равна [43]:

$$P_{chMPI-S} = P_{\max MPI-S} - 10 \lg N - \Delta p, \quad (7.6)$$

где:  $\Delta p$  – эксплуатационный запас, обеспечивающий необходимое значение OSNR в интерфейсе MPI-R к концу срока эксплуатации для нашего случая:  $\Delta p = 2$  дБ.

$$P_{chMPI-S} = 17 - 10 \cdot \lg 40 - 2 = -1.02 \text{ Вт}$$

С учётом затухания в первом пролёте, уровень мощности на входе линейного усилителя OLA1 в точке R1 составит:

$$P_{chR1} = P_{chMPI-S} - \alpha_{p.1}. \quad (7.7)$$

$$P_{chR1} = -1.02 - 4.75 = -5.95 \text{ дБм}$$

Уровень мощности канального сигнала на выходе линейного усилителя OLA1 в точке S1, имеющего усиление  $g_{OLA1} = 20$  дБ равна:

$$P_{chS1} = P_{chR1} + g_{OLA1} \quad (7.8)$$

$$P_{chS1} = -5.95 + 20 = 14.05 \text{ дБм}$$

Уровень мощности канального сигнала на входе предварительного усилителя OBU будет равна:

$$P_{chMPI-R} = P_{chS1} - \alpha_{p.2}$$

$$P_{chMPI-R} = 14.05 - 6.65 = 7.4 \text{ дБм}$$

На вход транспондера поступает сигнал 7.4 дБм. Чувствительность приемника в оптическом модуле составляет -18 дБм, уровень перегрузки составляет 0 дБм. Таким образом коэффициент ошибок BER остается в норме.

С учетом помех из-за нулевых флуктуаций вакуума мощность помех в интерфейсе MPI-R1 будет равна [43]:

$$P_{ASE MPI-R} = P_{ASE MPI-R} + P_{HFB}, \text{ дБм} \quad (7.9)$$

$$p = hf \Delta f \quad p = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 193,1 \cdot 10^{12} \cdot 50 \cdot 10^9 \\ = 6,4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$$

Подставим значения в формулу (7.10)

$$P_{ASE MPI-R} = 0,73 \cdot 10^{-6} + 6,4 \cdot 10^{-9} = 4,73 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Переведем полученное значение в дБм

$$P_{ASE MPI-R} = 10 \lg(4,73 \cdot 10^{-5}) = -43,24 \text{ дБм}$$

Рассчитаем отношение сигнал/шум на входе и выходе всех усилителей по формуле:

$$OSNR = P_{ch} + P_{ASE}, \text{ Б} \quad (7.10)$$

$$OSNR_{MPI-S} = P_{chMPI-S} - P_{ASE MPI-S} = -1,02 - (-30,99) = 29,97 \text{ дБ}$$

$$\text{OSNR}_{R1} = P_{\text{ch}R1} - P_{\text{ASE}R1} = -17,52 - (-47,49) = 29,97 \text{ дБ}$$

$$\text{OSNR}_{S1} = P_{\text{ch}S1} - P_{\text{ASE}S1} = 0,48 - (-29,49) = 29,97 \text{ дБ}$$

$$\text{OSNR}_{\text{MPI-R}} = P_{\text{chMPI-R}} - P_{\text{ASE MPI-R}} = -13,27 - (-43,24) = 29,97 \text{ дБ}$$

В результате проведенных расчетов видно, что OSNR OS в MPI-R с 29,97 дБ соответствует норме (более  $12 \pm 5$  дБ).

## Заключение

WDM-PON может предложить более высокую пропускную способность и дополнительные преимущества по сравнению с его приложениями. Используя выделенную длину волны канала для каждого абонента, WDM-PON часто считается более безопасным. Преимуществами XG-PON являются стандартизация, зрелость, стоимость и энергопотребление. Тенденция такова, что XG-PON предназначен для домашнего использования, а WDM-PON проверяется на предмет высокой пропускной способности бизнеса или обратной связи.

Наименьшее влияние интервала изменения интервала обслуживания на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) в обратном канале достигается с использованием технологии WDM-PON из-за отсутствия длительного процесса доступа и небольшого объема интервала обслуживания.

Отвечая на вопрос зачем нужна организация связи и использование технологии WDM на оптических сетях доступа, можно сказать что, бизнес-сервисы всегда разрабатывались симметрично, то есть требования к пропускной способности на сайтах клиентов и от них были в основном одинаковыми. И наоборот, требования к полосе пропускания для бытовых пользователей традиционно увеличивались в основном в одном направлении - к клиенту. Тем не менее, операторы начинают видеть увеличение полосы пропускания, используемое для передачи данных в восходящем направлении, что обусловлено одноранговыми приложениями. Если этот рост продолжится, предполагается, что требования к пропускной способности могут вскоре увеличиться до 100 Мбит / с для бытовых потребителей и более 10 Гбит / с для бизнес-пользователей. Операторам необходимо будет модернизировать свою инфраструктуру сети доступа с помощью технологий, которые могут масштабироваться в соответствии с требованиями их клиентов. По проделанным исследованиям, которые были осуществлены в программной среде Optisystem, можем подытожить и сказать, что система отвечает требованиям по стандарту ITU-T G.989.2 и работает корректно. Но, в силу того, что данная технология имеет высокую экономическую оценку, внедрять ее будет не выгодно. Так как эта магистерская диссертация базируется на основе исследования, мы можем смело говорить, что если не экономическая

часть, то в принципе сама технология имеет место быть и может быть использована на сети операторов Казахстана для обеспечения высокой скорости как для отдельных пользователей (user), таких как бизнес предприятия, государственные учреждения, так и для обычных пользователей. Так же обеспечить скорость в 1 Гбит/с на каждого абонента для отдаленной сельской местности.

Технология пассивной оптической сети (WDM-PON) дает возможность передавать по разделению длины волны, создавать новое направление в широкополосной оптической сети доступа. WDM-PON предоставляет открытую платформу, которая позволяет поставщикам услуг предоставлять гибкую транспортную систему, а также архитектуру для услуг тройного воспроизведения (голос, данные и видео).

По мере развертывания оптоволоконной сети ближе к конечным потребителям количество необходимых соединений будет увеличиваться. И, поскольку никогда не будет бесконечного количества доступных волокон, WDM-PON, похоже, будет все более ценным маршрутом для бизнеса и государственных учреждений. Если система WDM-PON правильно сконструирована, то возможно смешать различные технологии передачи. Следуя определенным правилам проектирования во время установки системы WDM-PON, можно разрешить поэтапное обновление канала до более высоких скоростей передачи, когда возникает потребность. Эти правила проектирования гарантируют, что требования канала OSNR будут выполнены в присутствии отражений и что межканальная перекрестная помеха будет избегаться. Результатом является открытая и гибкая сеть доступа, которая может поддерживать множество приложений и служб в одной инфраструктуре.

## Список литературы

1. Оптические мультиплексоры и демultipлексоры систем WDM / Н. Слепов //Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 8.2.
2. Лейкосапфир ( $Al_2O_3$ ). Оптика из сапфира [Электронный ресурс] / Материалы компании «Флюорит». – Режим доступа: <http://www.fluoride.su/Sapphire1.html>.
3. Былина М. С., Голубев А. С. Анализ возможности применения мультиплексора на отражательной призме по схеме Литтроу для систем CWDM // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. II-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей / под. ред. С. М. Доценко, сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич, Л. М. Минаков. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. - С. 692-695.
4. Шувалов В.П., Фокин В.Г. Оптические сети доступа большого радиуса действия. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 188с.
5. Рекомендации ITU-T G.983.1 (01/2005) Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON) // Международный Союз Электросвязи. Женева, 2005.
6. Hoon Kim. Transmission of 10-Gb/s Directly modulated RSOA Signals in Single-Fiber Loop-back WDM PONs // Photonics Technology Letters. 2011. Vol.23. No. 14. P. 965-967.
7. Hyeuk-Choon Known, Young-Yuk Won, Dae-Won Lee, Sang-Kook Han. WDM Passive Optical Network with Simultaneous Wireline/Wireless Downlink Transmission and Wavelength Reuse for Uplink Connection // Transparent Optical Networks. 2007. ICTON 07. 9th International Conference on. P. 9-11.
8. Zaineb Al-Qazwini, Hoon Kim. Symetric 10-Gb/s WDM-PON Using Directly Modulated Lasers for Downlink and RSOAs for Uplink // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol.30. No. 12. P. 1891-1899.
9. Фокин В.Г. Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети: Учебное пособие/ГОУ ВПО «СибГУТИ». - Новосибирск, 2009 г. - 206с.

10. Ipsita Sengupta, Abhirup Das Barman. Analysis of optical re-modulation by multistage modeling of RSOA//Optic. 2014. Vol. 125, Issue 14. P. 3393-3400.
11. Hyun-Soo Kim, Byung-Seok Choi, Ki-Soo Kim, Dong Churl Kim, O-Kyum Known, Dae-Kon Oh. Improvement of modulation bandwidth in multisection RSOA for colorless WDM-PON // Optics Express. Vol. 19. No.19. P. 16372-16378.
12. Qi Guo, An Vu Tran. Performance Enhancement in RSOA-Based WDM Passive Optical Networks Using Level Coding// Journal of Lightwave Technology. 2013. Vol.31. No.1. P. 67-73.
13. Chowdliury P.K. Enhances crosstalk tolerance in RSOA based WDM-PONs by using coded RZ modulation// Optik. 2014. Vol. 125. Issue 14. P. 2959-2962.
14. <https://optiwave.com/optisystem-overview/> Источник скачивания программной среды Optisystem
15. Dual-LP11 mode 4x4 MIMO-OFDM transmission over a two-mode fiber/A. Al Amin, A. Li, S. Chen, X. Chen, G. Gao, W. Shieh// Opt. Express. 2011. Vol.19, No. 17. P. 16672–16679.
16. Takahashi H., Oda K., Toba H. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on N x N optical intercorrection// IEEE Journal of Lightwave Tech. 1996. Vol. 14. №6. PP. 1097-1105.
17. ITU-T Recommendation G.652. URL: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.652-200911-S!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.652-200911-S!!PDF-E&type=items) ( дата обращения: 28.12.2017)
18. Noshad M., Rostami A. FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers // Optik. 2012. 123, Is. 9. S. 758–760.
19. Горлов Н.И., Микиденко А.В., Оптические линии связи и пассивные компоненты ВОСП: Учеб пособие. - Новосибирск: СибГУТИ,2003. – 230 с.