

Столяр Данила Сергеевич

**Полностью оптическое преобразование форматов сигналов в  
оптических сетях**

Направление подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
направленность – Сети, системы и устройства телекоммуникаций

программа академической магистратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации  
на соискание квалификации (степени) магистра

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель

Д.В. Кусайкин

Рецензент

Защита состоится «30» июня 2020г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Актуальность темы исследования обусловлена реализацией программы «Цифровая экономика РФ». В современном мире неуклонно растут скорости передачи данных, наблюдается все большее количество трафика в сетях жилых домов, офисов, производственных предприятий и во многих других сферах. Для удовлетворения столь высоких требований к скоростям передачи в современном мире используются волоконно-оптические сети. Данная технология позволяет обеспечить высокую скорость передачи данных, надежность и эффективность, недоступную системам, использующим другие среды. Однако в волоконно-оптических системах передачи имеется важная проблема – необходимость в преобразовании формата данных не на электрическом уровне, а оптическом. Такая необходимость обусловлена использованием различных форматов импульсной модуляции. Например, в системах WDM с большим числом оптических каналов и относительно небольшими скоростями передачи широкое распространение получил формат non-return-to-zero (NRZ) из-за его высокой спектральной эффективности, простоте применения и устойчивости к временному джиттеру. В то же время широко используется формат return-to-zero (RZ), который хотя и обладает в два раза более широким спектром в сравнении с NRZ, но лучше подходит для систем с временным мультиплексированием благодаря устойчивости к эффекту дисперсии.

Традиционный подход преобразования формата кода оптического сигнала требует преобразования сигнала в электрическую форму. Для современных высокоскоростных систем это условие является неприемлемым. Чтобы решить эту проблему, начали проводиться исследования, целью которых является нахождение способа полностью оптического преобразования формата кода сигнала. Данная тема активно обсуждается и исследуется в зарубежных публикациях, однако информации по данной тематике очень мало в отечественных публикациях. Выбранная область исследования попадает под проект «Цифровые технологии» программы «Цифровая экономика РФ», что делает тему исследования актуальной.

**Предметом исследования** являются методы полностью оптического преобразования форматов сигнала.

**Объектом исследования** являются оптические системы передачи данных, использующие полностью оптическое преобразование форматов данных.

**Целью диссертационной работы** является изучение технологий полностью оптического преобразования форматов сигналов в оптических сетях.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие основные **задачи исследования**:

- 1) провести анализ состояния предметной области;
- 2) определить наиболее эффективный программный инструмент для проведения исследования;
- 3) построить модели трех методов полностью оптического преобразования формата сигнала RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK;

4) провести анализ результатов исследования методов полностью оптического преобразования формата сигнала из RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK.

**Методы исследования.** В работе использованы методы вычислительной математики, системного анализа, имитационного моделирования, математической статистики.

**Научная значимость** заключается в оценке эффективности методов полностью оптического преобразования форматов сигналов RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK в волоконно-оптических сетях связи.

**Практическая значимость** заключается в повышении эффективности методов конвертирования форматов сигналов RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK в волоконно-оптических сетях связи без электрического преобразования оптического сигнала.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) форма исходного RZ сигнала успешно преобразована в NRZ формат;
- 2) ширина спектра исходного RZ-DQPSK сигнала в результате преобразования;
- 3) Q-фактор преобразованных сигналов;
- 4) расчетный коэффициент ошибок преобразованных сигналов.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается обоснованным применением методов системного анализа, имитационного моделирования, математической статистики, численного анализа и вычислительной математики, а также согласованностью теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

**Апробация результатов.**

1) материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ «Полностью оптическое преобразование формата из RZ-DPSK в NRZ-DPSK на скорости 40 Гбит/с» – г. Екатеринбург, 2018 г

2) материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ «Исследование полностью оптической модуляции» – г. Екатеринбург, 2018 г

3) материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, «Полностью оптическое преобразование формата сигнала с сохранением длины волны» – г. Екатеринбург, 2019 г

4) электронное научно-практическое периодическое издание «Вестник современных исследований», выпуск № 12-5 (27) (декабрь, 2018), «Методы полностью оптического преобразования формата кода сигнала в современных ВОСП»

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 1 статья в научных журналах РИНЦ, 3 статьи в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 9 наименований, содержит 85 рисунков и 13 таблиц. Объем диссертационной работы 92 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность.

В **первой главе** рассматриваются результаты существующих зарубежных исследований на тему полностью оптической модуляции.

Было рассмотрено исследование, проведенное китайскими учеными Чжан Чжэн, Пань Ди, Юй Юй и Чжан Синь-Лян, затрагивающее полностью преобразование основанное на интерферометре задержки.

В 2011 году китайские ученые Чжан Чжэн, Пань Ди, Юй Юй и Чжан Синь-Лян провели исследования по преобразованию формата сигнала RZ-DPSK в NRZ-DPSK при канальной скорости 40 Гбит/с. Используемая ими схема состоит из DPSK – передатчика, содержащего РОС-лазер и работающего на длине волны 1550,92 нм, и двух модуляторов Маха-Цендера (MZM). Первый MZM модулирует оптический сигнал на основе псевдослучайной последовательностью битов (PRBS) со скоростью 40 Гбит/с. Формирование PRBS производится генератором последовательностей битов (BPG), длина последовательности составляет  $2^{31}-1$ . Вторым MZM работает как формирователь RZ импульсов с коэффициентом заполнения 33% и запускается с помощью счетчика с частотой 20 ГГц. Сгенерированный таким образом RZ-DPSK сигнал усиливается с помощью эрбиевого волоконного усилителя (EDFA) до уровня мощности 0 дБм. Преобразование формата состоит из двух частей: из задержки на полбита в интерферометре задержки (DI) с последующим пропусканием сигнала через полосовой фильтр с полосой пропускания 1 нм и центральной длиной волны 1550,92 нм. Задержка в DI равна 12,5 пс, фазовый сдвиг контролируется через изменение температуры. Изменяя сдвиг фазы, гребнеобразный спектр передаваемого сигнала в DI может смещаться без искажений, обеспечивая прозрачность для длин волн. Более того, данная схема неподвержена поляризации и нечувствительна к мощности сигнала из-за применения только пассивных элементов.

В сравнении с NRZ-DPSK сигналом, сгенерированным напрямую в передатчике, качество преобразованного сигнала практически не уступает. Потери на преобразование составляют 0,7 дБ при BER равном  $10^{-9}$ . Данная схема невосприимчива к поляризации и не зависит от длины волны, а также не имеет ограничений по скорости передачи.

Вторым шагом было рассмотрение исследования, проведенного Джатиндером Сингхом. В данном исследовании схема полностью оптического преобразования строилась на основе интерферометра Маха-Цендера.

В 2013 году Джатиндер Сингх провел исследования по NRZ-RZ преобразованию, основанные на интерферометре Маха-Цендера. Используемая им схема исследовалась при канальной скорости 60 Гбит/с.

Принцип работы заключается в разделении NRZ сигнала на две части, одна из которых проходит напрямую, а вторая задерживается на регулируемый промежуток времени (3, 5, 10, 15 и 20 пс), после чего сигналы вновь

объединяются. В ходе исследования было замечено, что чем меньше задержка между двумя частями сигнала, тем меньше коэффициент заполнения и тем шире спектр сигнала.

Принцип преобразования сигнала изображен на рисунке 1.

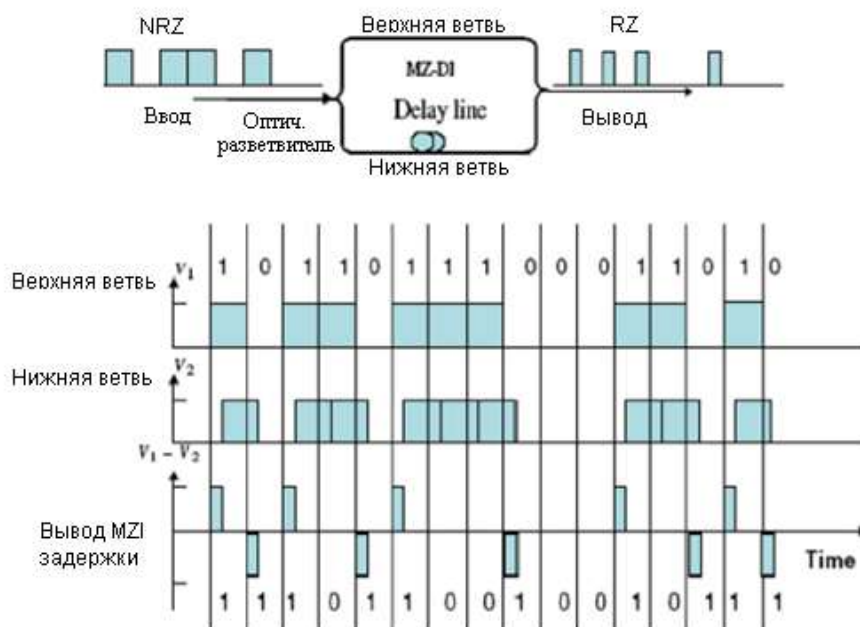


Рисунок 1 – Принцип преобразования сигнала

По результатам проведенных исследований было выявлено, что при задержке более 15 пс качество сигнала начинает значительно падать. Это связано с тем, что при скорости в 60 Гбит/с, длительность импульса составляет 8,3 пс, и для получения хорошего качества сигнала требуется задержка менее 8,3 пс.

Далее представлена форма сигнала при канальной скорости 60 Гбит/с: исходного NRZ (рисунок 2) и преобразованного в RZ с задержкой между плечами интерферометра Маха-Цендера в 5, 10 и 15 пс (рисунки 3, 4 и 5).

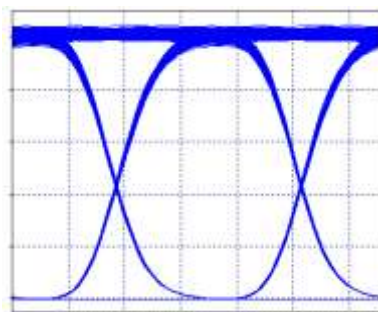


Рисунок 2 – Глаз-диаграмма исходного NRZ-RZ сигнала при канальной скорости 60 Гбит/с

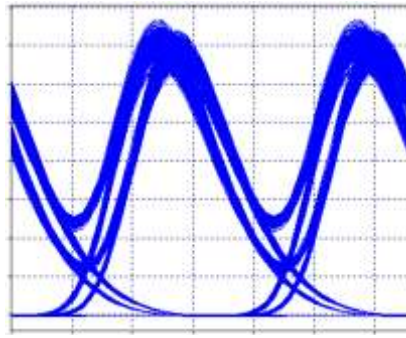


Рисунок 3 – Глаз-диаграмма преобразованного NRZ-RZ сигнала с задержкой 5 пс при канальной скорости 60 Гбит/с

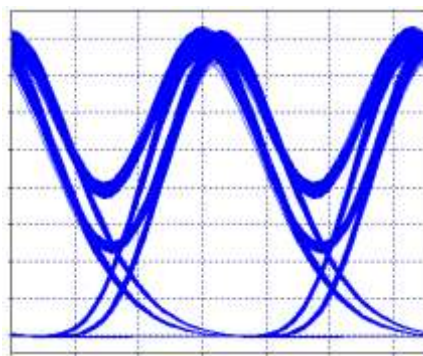


Рисунок 4 – Глаз-диаграмма преобразованного NRZ-RZ сигнала с задержкой 10 пс при канальной скорости 60 Гбит/с

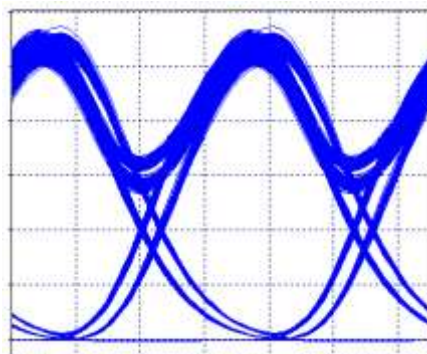


Рисунок 5 – Глаз-диаграмма преобразованного NRZ-RZ сигнала с задержкой 15 пс при канальной скорости 60 Гбит/с

По приведенным выше рисункам можно определить, что чем больше задержка в интерферометре, тем хуже качество конвертированного сигнала.

В проведенном эксперименте данную схему преобразования также использовали для преобразования RZ-NRZ. Исходный электрический сигнал имел модуляцию RZ и канальную скорость 60 Гбит/с. Коэффициент заполнения

сигнала равен 0,5. На рисунках 6, 7 и 8 представлена форма сигнала: исходная, конвертированная в NRZ при задержке 5 пс и 10 пс соответственно.

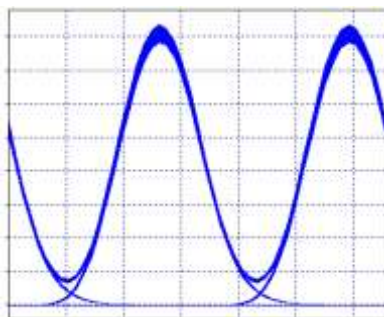


Рисунок 6 – Глаз-диаграмма исходного RZ-NRZ сигнала при канальной скорости 60 Гбит/с

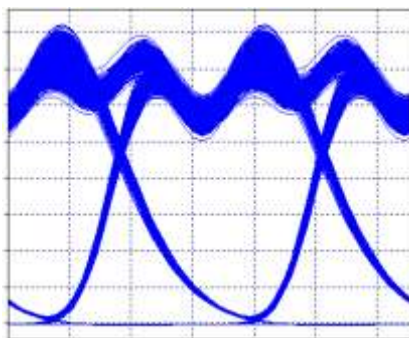


Рисунок 7 – Глаз-диаграмма преобразованного RZ-NRZ сигнала с задержкой 5 пс при канальной скорости 60 Гбит/с

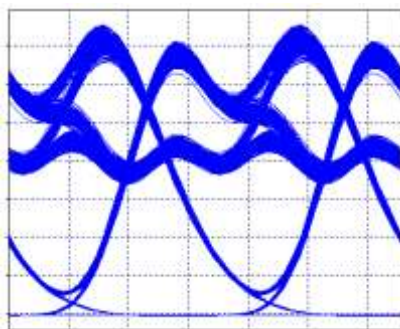


Рисунок 8 – Глаз-диаграмма преобразованного RZ-NRZ сигнала с задержкой 10 пс при канальной скорости 60 Гбит/с

По приведенным выше рисункам можно определить, что чем больше задержка в интерферометре, тем хуже качество конвертированного сигнала.



Для сравнения эффективности данной схемы в преобразовании формата сигнала NRZ-RZ и RZ-NRZ в исследовании были приведены данные замеров, наглядно показывающие результаты преобразования. График зависимости  $K_{ош}$  от времени задержки представлен на рисунке 9.

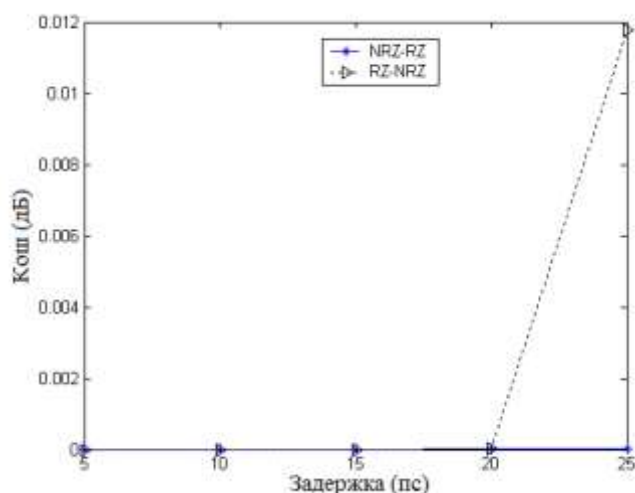


Рисунок 9 – График зависимости  $K_{ош}$  от времени задержки

Из рисунка видно, что коэффициент ошибок практически постоянен для преобразования NRZ-RZ при задержках от 5 пс до 25 пс, но для преобразования RZ-NRZ  $K_{ош}$  и скачок на промежутке 20 пс-25 пс.

При задержке в 15 пс, данная схема может провести преобразование NRZ-RZ с  $K_{ош}=10^{-40}$  и чувствительностью минус 90 дБм. Для преобразования RZ-NRZ при эквивалентном  $K_{ош}$  чувствительность равна минус 94,3 дБм. Таким образом, преобразование NRZ-RZ на 4,3 дБм менее чувствительно по сравнению с RZ-NRZ. График сравнения чувствительности представлен на рисунке 10.

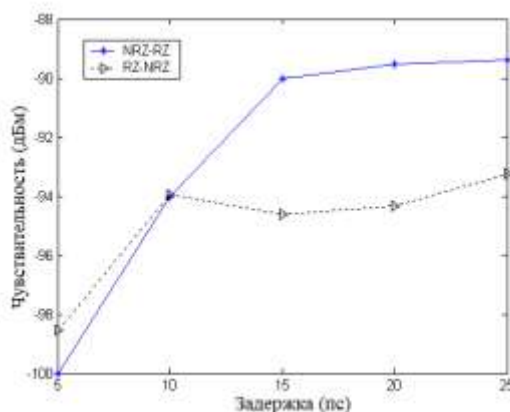


Рисунок 10 – График зависимости чувствительности от времени задержки

По данным о добротности, приведенным в исследовании, был составлен график зависимости добротности от времени задержки, представленный на рисунке 11.

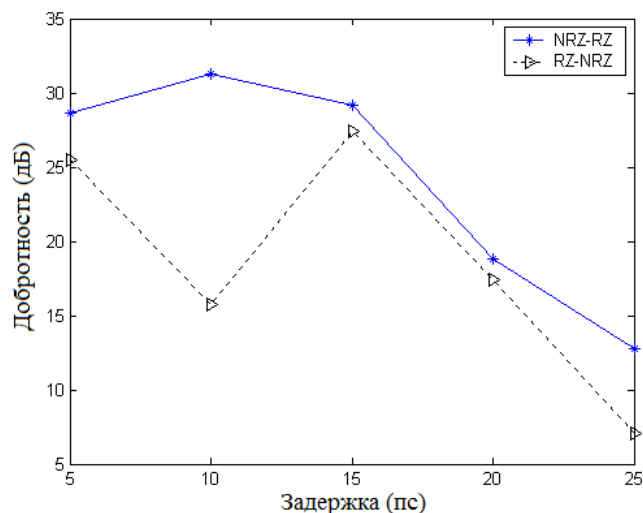


Рисунок 11 – График зависимости добротности от времени задержки

Из данных, приведенных на графике видно, что для достижения хорошего качества конвертированного сигнала, задержка между двумя ветвями интерферометра Маха-Цендера требуется менее 8,3 пс, так как время возрастания и убывания оптического импульса при канальной скорости в 60 Гбит/с равняется 8,3 пс.

Результаты замеров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров преобразования NRZ-RZ и RZ-NRZ

Задержка, пс	K <sub>ош</sub> , дБ		Чувствительность, дБм		Добротность	
	NRZ-RZ	RZ-NRZ	NRZ-RZ	RZ-NRZ	NRZ-RZ	RZ-NRZ
5	10 <sup>-40</sup>	10 <sup>-40</sup>	-100	-98,55	28,63	25,45
10	10 <sup>-40</sup>	10 <sup>-40</sup>	-94	-93,95	31,29	15,74
15	10 <sup>-40</sup>	10 <sup>-40</sup>	-90	-94,63	29,14	27,45
20	2,9×10 <sup>-18</sup>	1,7×10 <sup>-13</sup>	-89,54	-94,35	18,8	17,40
25	6,61×10 <sup>-6</sup>	0,01176	-89,37	-93,26	12,78	7,08

Третьим рассмотренным исследованием было исследование, проведенное Мустафой Фаргалом Ахмедом и Ахмедом Бакри. Данное исследование рассматривало линейную частотную модуляцию излучения высокоскоростных полупроводниковых лазеров при канальной скорости 40 Гбит/с, а также их производительность в оптических системах связи.

В 2014 году Мустафой Фаргалом Ахмедом и Ахмедом Бакри было проведено исследование с целью оценки эффективности оптоволоконных систем передачи с прямой модуляцией при канальной скорости 40 Гбит/с. Данное исследование рассматривало линейную частотную модуляцию излучения высокоскоростных полупроводниковых лазеров при канальной скорости 40 Гбит/с, а также их производительность в оптических системах связи. Экспериментальная схема, использовавшаяся в этом исследовании, представлена на рисунке 12.

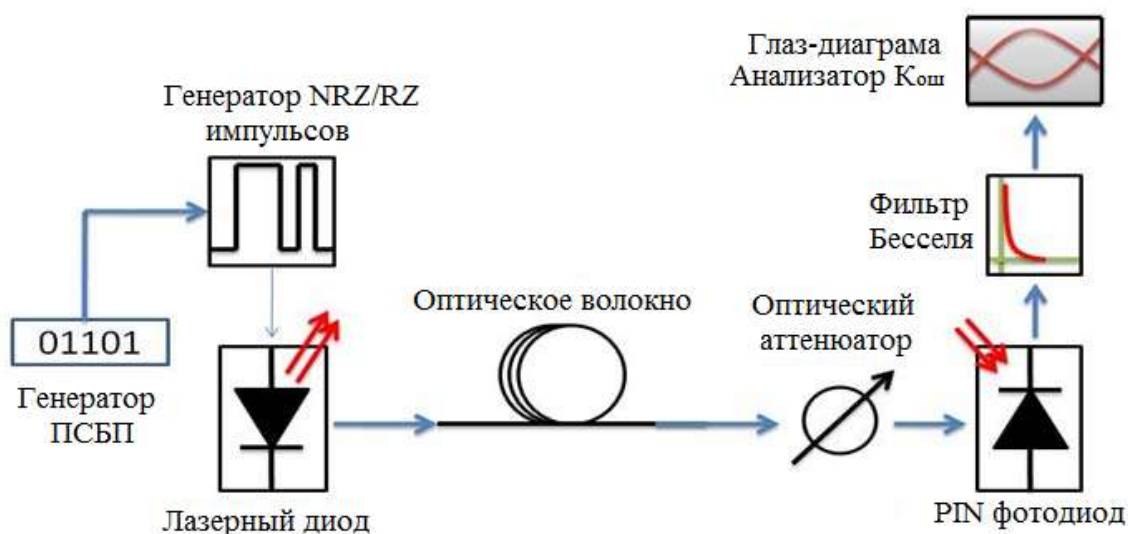


Рисунок 12 – Схема экспериментальной установки

Смоделированная в исследовании система передачи использует высокоскоростной полупроводниковый лазерный диод. Генератор псевдослучайной битовой последовательности (ПСБП) генерирует поток данных со скоростью 40 Гбит/с с псевдослучайной последовательностью в  $2^{10}-1$  битов. Сгенерированный таким образом поток данных преобразуется в электрический сигнал с помощью генератора импульсов. Далее происходит объединение информационного и модулирующего сигнала с помощью прямой модуляции, после чего сигнал передается посредством лазерного диода в стандартное одномодовое оптическое волокно. На приемном конце, оптический сигнал преобразуется в электрическую форму посредством фотодетектора на основе PIN-фотодиода. Принятая информация впоследствии анализируется на ошибки приема «0» и «1» для определения  $K_{ош}$ . Моделирование и анализ данной системы проводился с помощью программного обеспечения Optisystem.

В результате данного исследования были получены графики по замеренным в ходе эксперимента данным. Полученные графики изображены на рисунках 13 и 14.

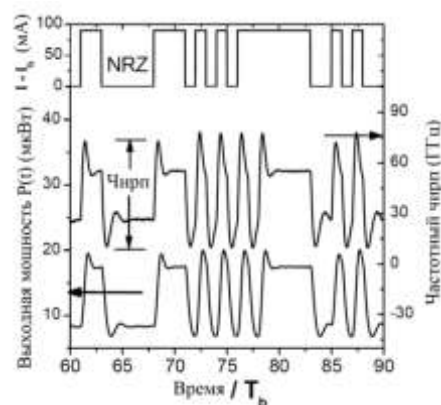


Рисунок 13 – Форма волны модулированного NRZ сигнала и чирп лазерного излучения при канальной скорости 40 Гбит/с

На полученных графиках наглядно изображено колебание формы волны сигнала. Форма волны значительно отличается от прямоугольной, что особенно заметно на рисунке 14, так как модулированный RZ сигнал возвращается к «0» после каждой «1». Таким образом, чирп оптического сигнала составляет 65,1 ГГц и 72,8 ГГц для сигналов с модуляцией NRZ и RZ соответственно.

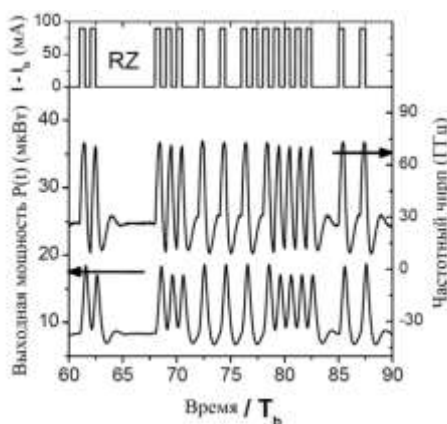


Рисунок 14 – Форма волны модулированного RZ сигнала и чирп лазерного излучения при канальной скорости 40 Гбит/с

Далее в исследовании рассматривалась характеристика данной оптической системы передачи при канальной скорости 40 Гбит/с. Для оценки эффективности системы была представлена глаз-диаграмма принятого сигнала, зависимость  $K_{\text{ош}}$  от длины оптического тракта с использованием оптического волокна с различными значениями дисперсии.

Глаз-диаграмма сигнала, проходящего по ОВ без дисперсии представлена на рисунке 15. Обе диаграммы, изображенные на рисунке, показывают сигнал с  $K_{\text{ош}} 10^{-9}$ . График зависимости  $K_{\text{ош}}$  от длины ОВ изображен на рисунке 16.

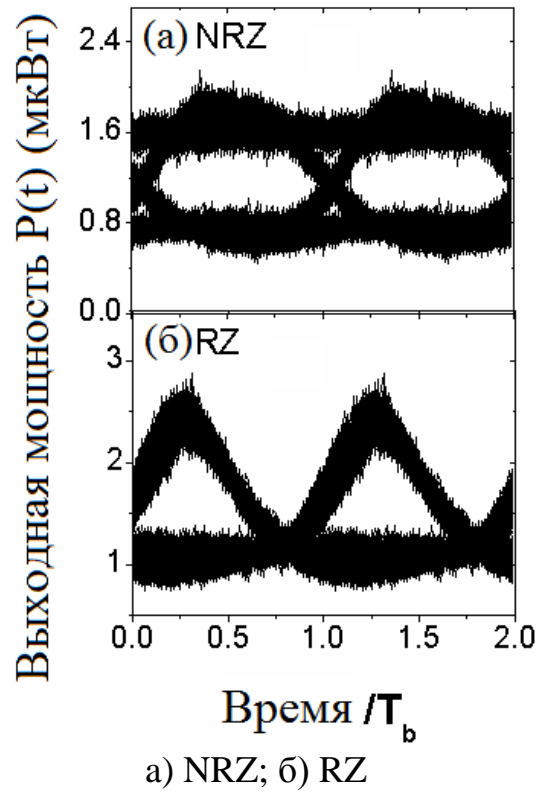


Рисунок 15 – Глаз-диаграмма сигнала с модуляцией в ОВ без дисперсии

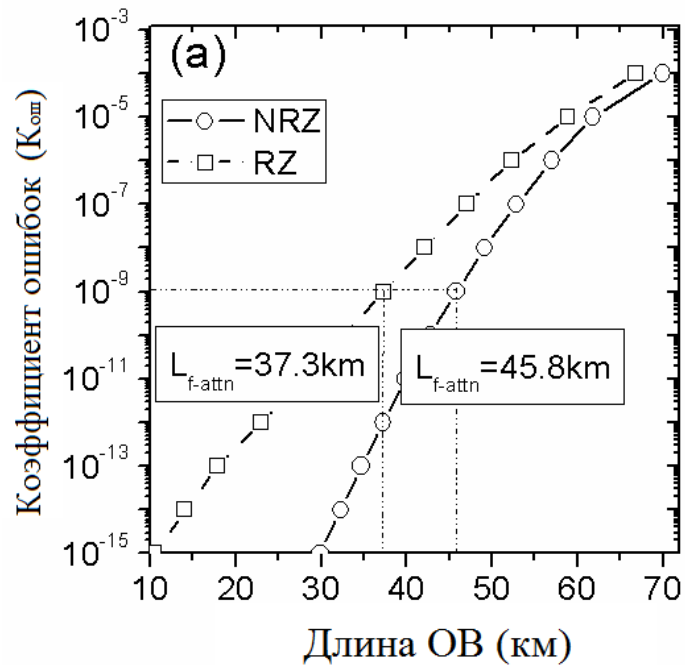


Рисунок 16 – График зависимости  $K_{ош}$  от длины ОВ без дисперсии

На рисунках 17 и 18 приведены графики, построенные по данным для ОВ с дисперсией.

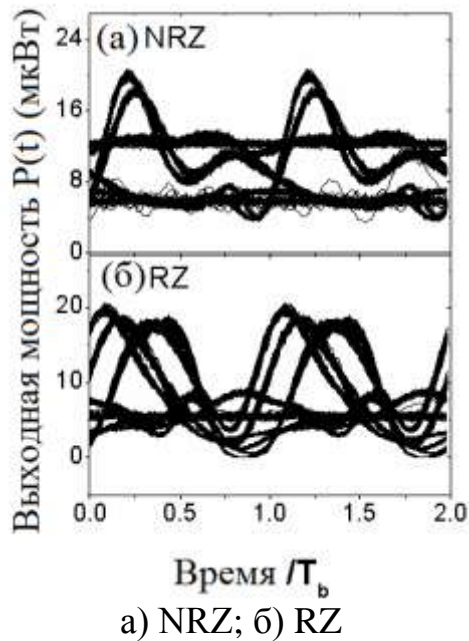


Рисунок 17 – Глаз-диаграмма сигнала с модуляцией в ОВ с дисперсией

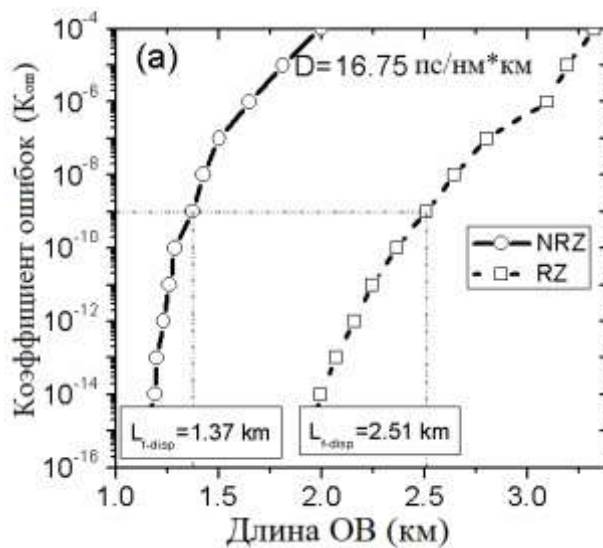


Рисунок 18 – График зависимости  $K_{ош}$  от длины ОВ с дисперсией

Из графика видно, что в ОВ с присутствующей дисперсией качество сигнала значительно уступает теоретическому ОВ без дисперсии. Дальность передачи в таком ОВ очень сильно ограничена в сравнении с теоретическим ОВ. Поэтому в данном исследовании также провели испытание системы с использованием ОВ со смещенной ненулевой дисперсией.

В экспериментальной схеме стандартное одномодовое ОВ было заменено на ОВ со смещенной ненулевой дисперсией (+D-NZSDF), уменьшив таким образом дисперсию с 16,75 пс/нм\*км до 4,5 пс/нм\*км, увеличивая тем самым

дальность передачи оптического сигнала до 9,14 км и 4,78 км для типов модуляции RZ и NRZ соответственно.

График зависимости Кош от длины ОВ представлен на рисунке 19.

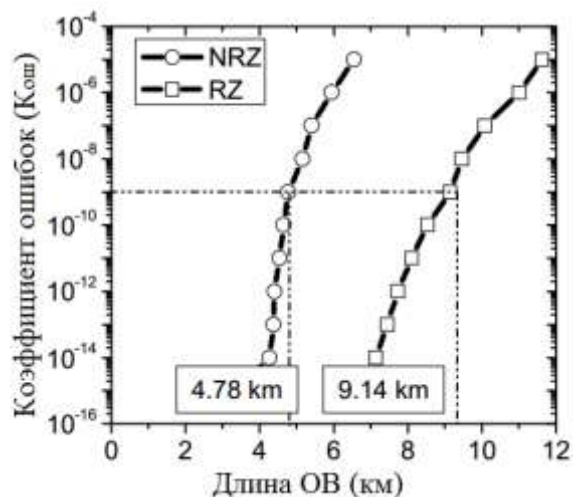


Рисунок 19 – График зависимости  $K_{ош}$  от длины ОВ со смещенной ненулевой дисперсией

Сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приводится выбор платформы для симуляции разрабатываемой схемы. Выбор проводился между программными комплексами OptiSystem и MATLAB Simulink. В результате выбор был сделан в пользу комплекса MATLAB Simulink.

Также в данной главе были рассмотрены особенности моделирования ВОЛС, описана модуляция и линейные коды, используемые в ВОЛС. Примеры данных кодов изображены на рисунке 20.

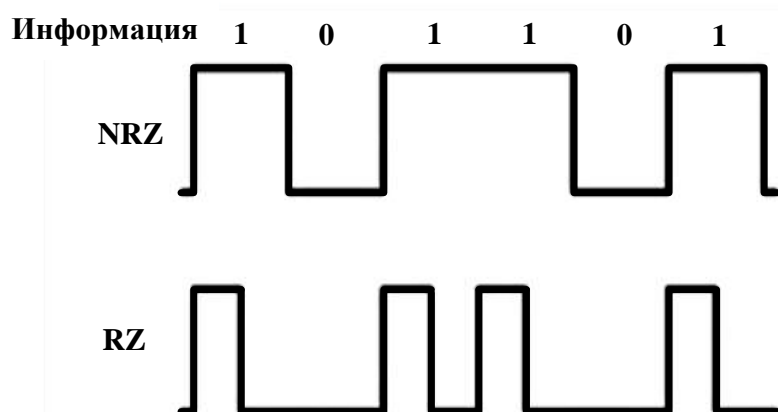


Рисунок 20 – Линейные коды

Линейный код NRZ (NRZ, Non Return to Zero – без возвращения к нулю) является преобладающим кодом в последние два десятилетия, поскольку является весьма простым в реализации и имеет относительно узкую полосу спектра. Формат NRZ реализуется следующим образом. Логический «0» является сигналом меньшего уровня, логическая «1» – более высокий логический уровень.

RZ–ASK также известен как формат модуляции с «возвращением к нулю» RZ (RZ, Return to Zero), имеющий ряд преимуществ перед сигналами NRZ. Отличие от NRZ состоит в том, что уровень импульсов RZ всегда возвращается к нулю даже при двух последовательно идущих логических «1».

В данной главе также рассматриваются особенности моделирования RZ сигналов в среде Simulink.

В **третьей** главе представлена экспериментальная схема и анализ результатов проведения эксперимента.

Экспериментальная схема MATLAB Simulink изображена на рисунке 21.

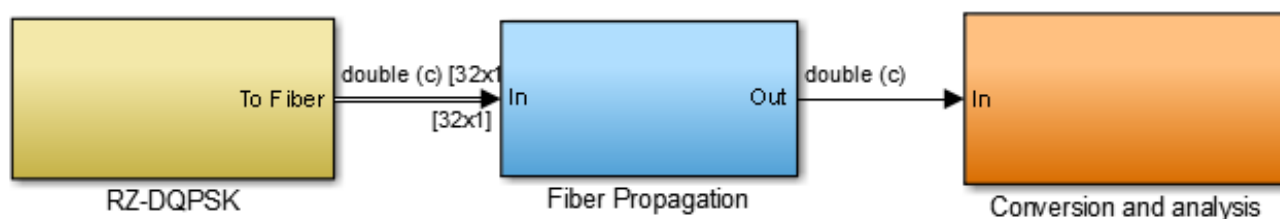


Рисунок 21 – Экспериментальная схема в MATLAB Simulink

Представленная на рисунке 22 схема состоит из трех основных блоков:

- блока генератора оптического RZ-DQPSK сигнала;
- блока симуляции прохождения сигнала через оптическое волокно;
- блока преобразования и анализа сигнала.

MATLAB Simulink схема генератора оптического RZ-DQPSK сигнала изображена на рисунке 22. Данная схема функционирует на основе DFB лазерного диода, генерирующего оптический сигнал на длине волны 1550 нм. Далее, при помощи модуляторов Маха-Цендера формируются импульсы формата RZ с 50% коэффициентом заполнения. Схема формирователя импульсов изображена на рисунке 23

Информационные импульсы формата DQPSK формируются в прекодер. Схема прекодера изображена на рисунке 24.



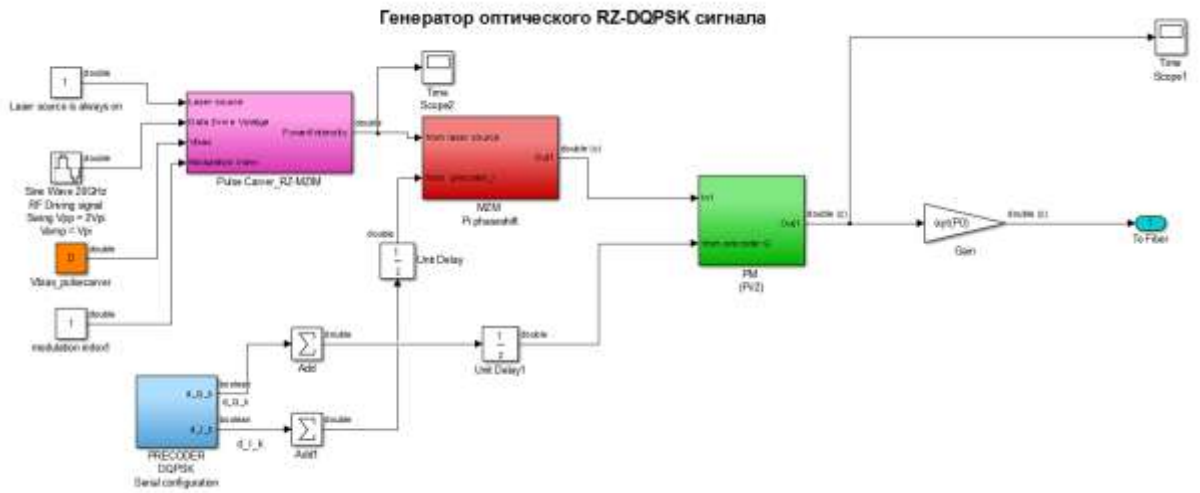


Рисунок 22 – Схема генератора оптического RZ-DQPSK сигнала

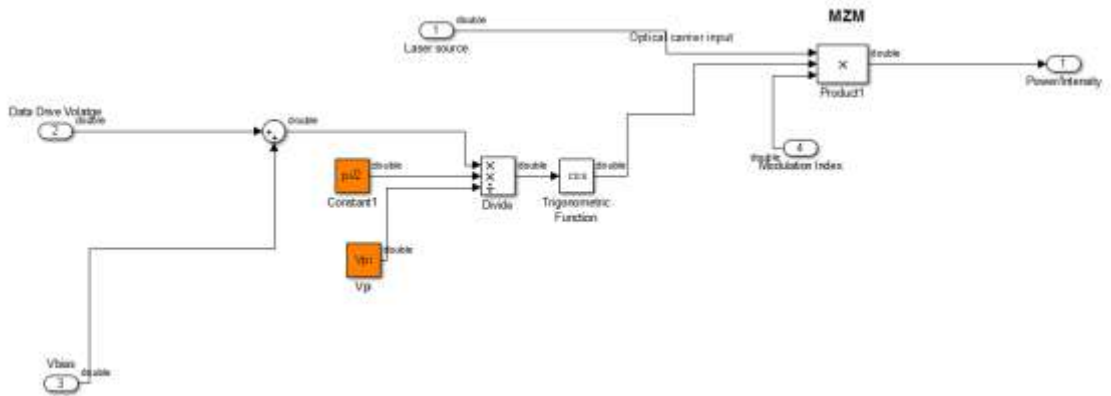


Рисунок 23 – Схема формирователя импульсов RZ

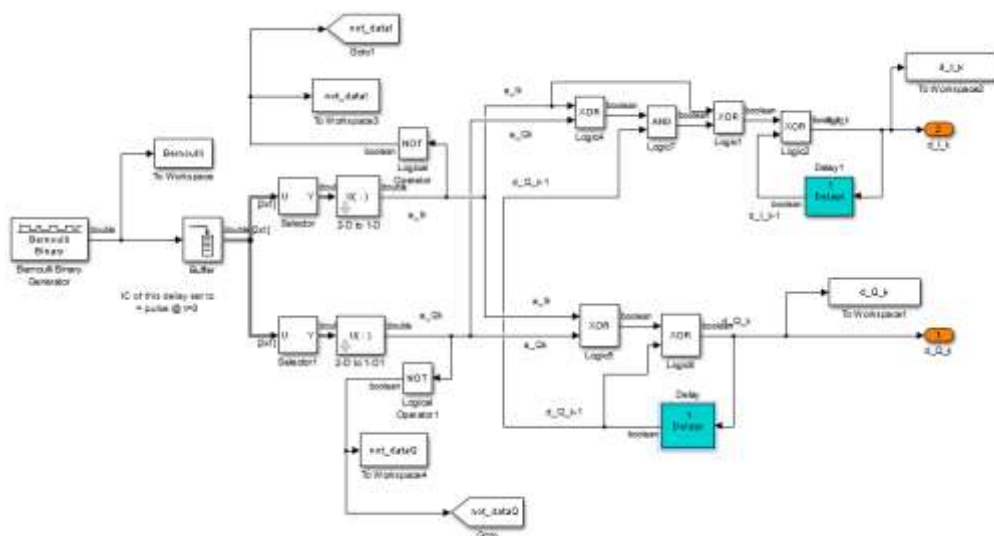


Рисунок 24 – Схема прекодера

Преобразованный фазовращателем сигнал подается на фазовый модулятор. Фазовый модулятор изменяет фазу импульса на  $\pi/2$ , если Q-компонента в этот момент времени равна 1. Если Q-компонента равна 0, импульс остается неизменным. Схема фазового модулятора изображена на рисунке 25.

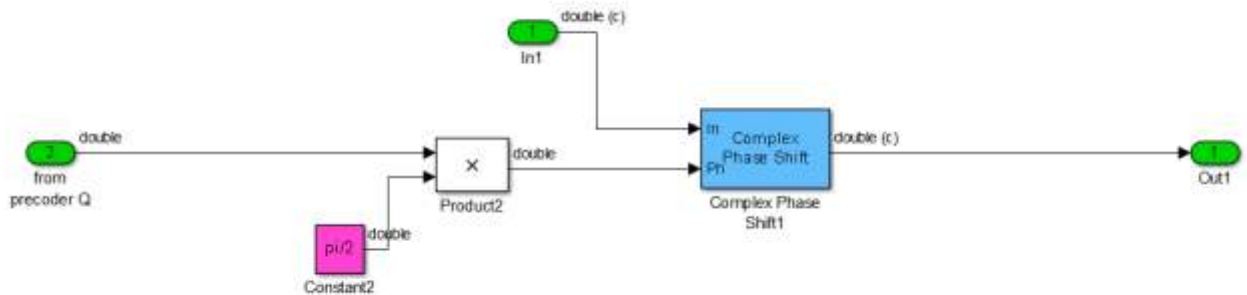


Рисунок 25 – Схема фазового модулятора

Сигнал на выходе из фазового модулятора является RZ-DQPSK сигналом. Временная осциллограмма полученного сигнала изображена на рисунке 26.

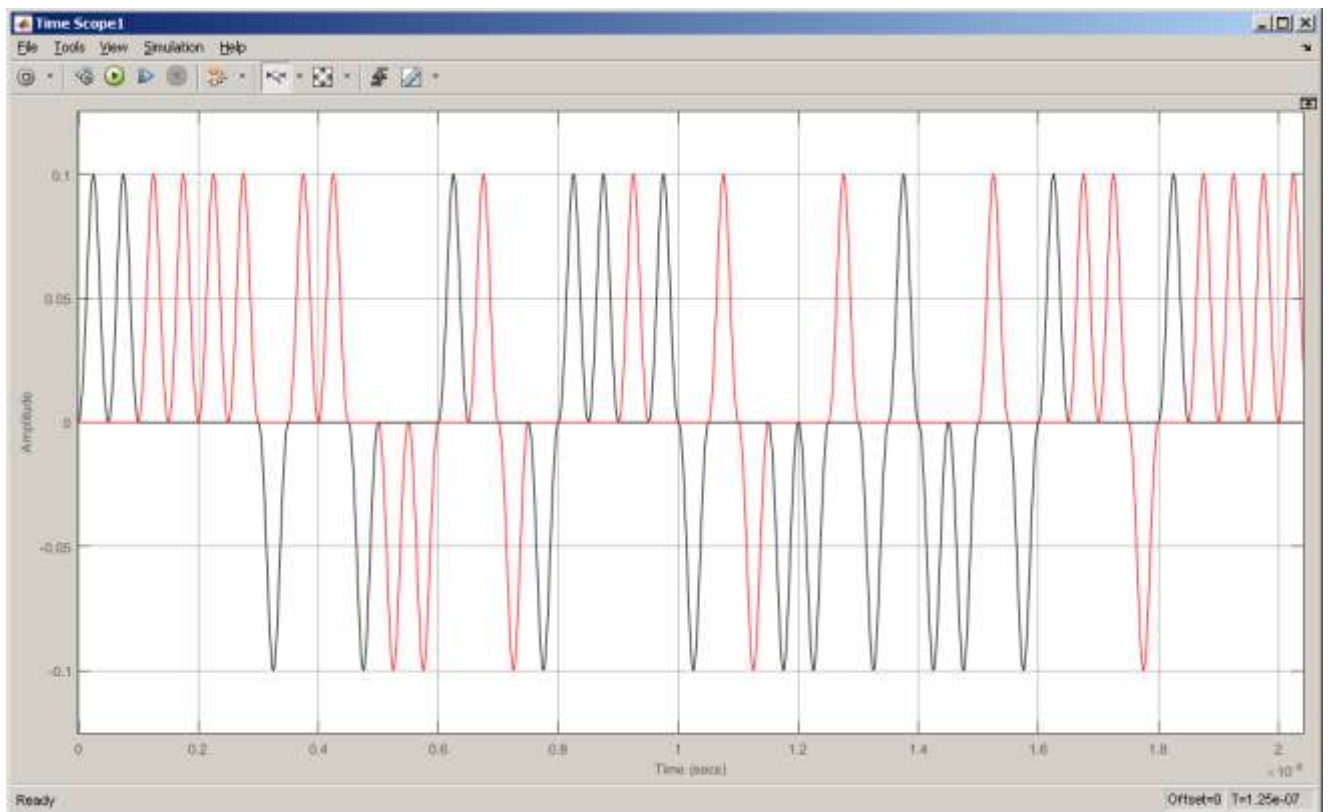


Рисунок 26 – Временная осциллограмма полученного RZ-DQPSK сигнала

На полученной осциллограмме черным цветом отображаются I-компоненты сигнала, а красным – Q-компоненты.

RZ-DQPSK сигнал далее поступает на блок, симулирующий прохождение сигнала через одномодовое оптическое волокно. Данный блок изображен на рисунке 27.

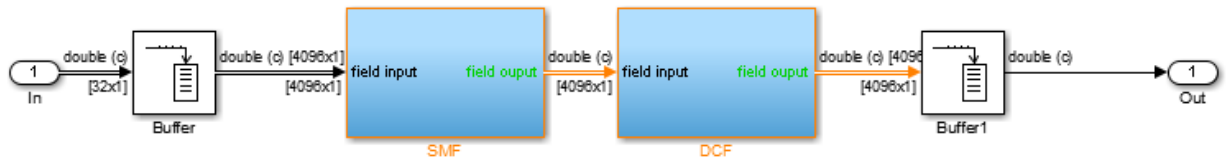


Рисунок 27 – Блок оптического волокна

Данный блок симулирует прохождение через 100 км одномодового оптического волокна с последующей компенсацией дисперсии.

После блока симуляции ОВ, сигнал поступает в блок полностью оптического преобразования сигнала. Блок изображен на рисунке 28.

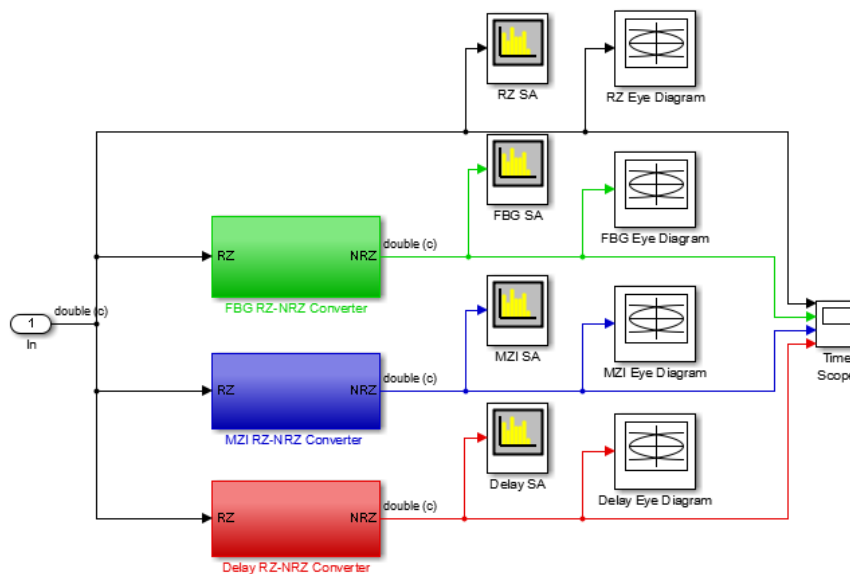


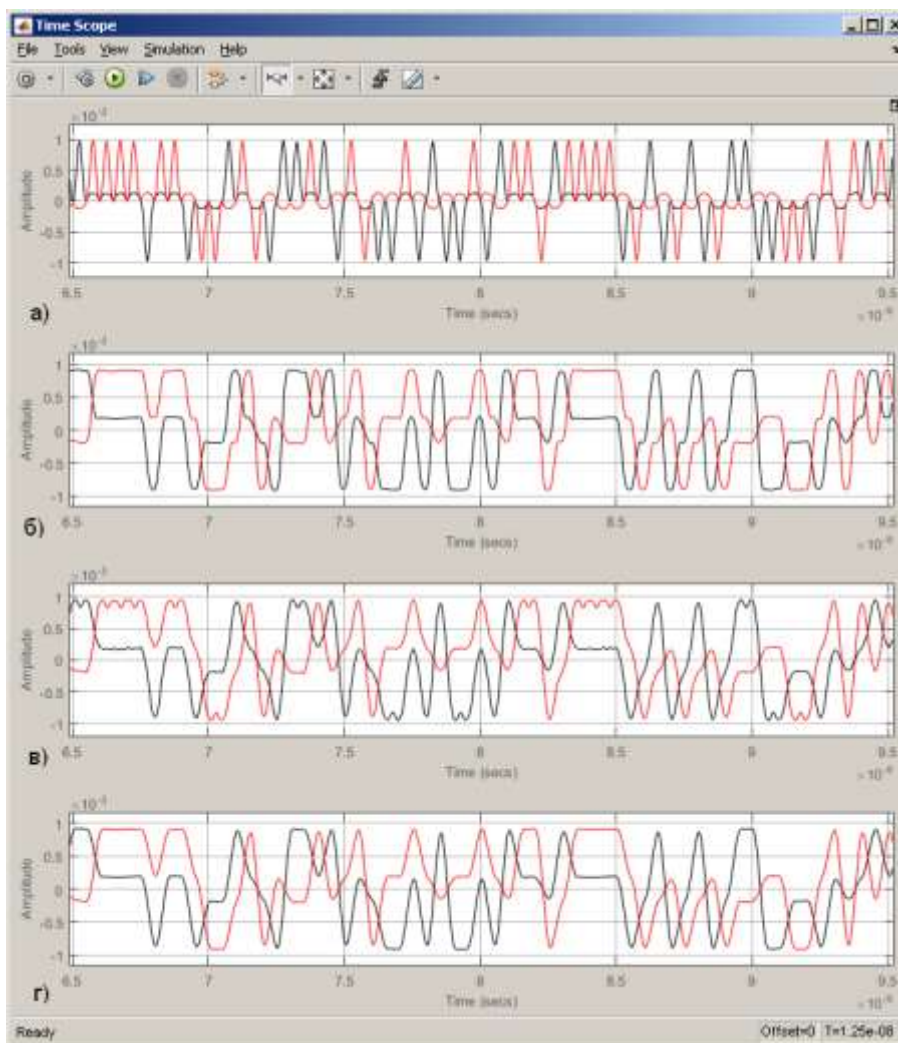
Рисунок 28 – Блок преобразования и анализа

Данный блок состоит из трех подблоков, представляющих собой три разных метода полностью оптического преобразования сигнала.

- метод на основе фильтра с решеткой Брэгга (FBG);
- метод на основе интерферометра Маха-Цендера (MZI);

- метод на основе интерферометра задержки.

Осциллограммы переданных оригинального и преобразованных сигналов после прохождения оптического волокна изображены на рисунке 29.



а) RZ; б) FBG; в) MZI; г) Задержки

Рисунок 29 – Осциллограммы сигналов

Первый метод основывается на использовании оптического волокна с решеткой Брэгга в качестве оптического фильтра. Второй метод основывается на использовании интерферометра Маха-Цендера. Третий метод заключается в применении интерферометра задержки.

Фильтр на основе решетки Брэгга является участком оптического волновода, в сердцевине которого присутствуют сегменты с варьирующимся показателем преломления, что действует как полупрозрачное зеркало, отражающее часть оптического сигнала. Таким образом, часть спектра сигнала подавляется.

В интерферометре Маха-Цендера сигнал делится на две части, после чего складывается вновь. Одно из плеч интерферометра задерживает сигнал на

полбита, что равняется 12.5 пс задержки. На практике это можно реализовать увеличением длины оптического волокна на 2.6 мм. Далее следует узкополосный 0.3 нм фильтр, завершающий преобразование.

Анализ глаз-диаграмм сигналов, полученных в результате эксперимента представлены в таблицах 2-4.

Таблица 2 – Результаты расчета параметров сигнала (FBG)

Параметр	Ед. изм.	$\varphi = \pi$	$\varphi = 0$	$\varphi = 2\pi$
EX	дБ	6,791	6,755	6,791
$\sigma_1$		$0,0833 \times 10^{-9}$	$0,333 \times 10^{-9}$	$0,0833 \times 10^{-9}$
$\sigma_0$		$0,333 \times 10^{-9}$	$0,333 \times 10^{-9}$	$0,333 \times 10^{-9}$
Q		11,885	13,552	11,885
$E_{\min}$	Вт	$8,506 \times 10^{-9}$	$19,1 \times 10^{-9}$	$8,506 \times 10^{-9}$
BER		$4,27 \times 10^{-5}$	$9,68 \times 10^{-7}$	$4,27 \times 10^{-5}$

Таблица 3 – Результаты расчета параметров сигнала (MZI)

Параметр	Ед. изм.	$\varphi = \pi$	$\varphi = 0$	$\varphi = 2\pi$
EX	дБ	6,791	6,883	6,791
$\sigma_1$		$0,0833 \times 10^{-9}$	$0,833 \times 10^{-9}$	$0,0833 \times 10^{-9}$
$\sigma_0$		$0,001 \times 10^{-9}$	$0,183 \times 10^{-9}$	$0,001 \times 10^{-9}$
Q		11,379	12,23	11,379
$E_{\min}$	Вт	$36,32 \times 10^{-9}$	$1,12 \times 10^{-9}$	$36,32 \times 10^{-9}$
BER		$1,051 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-5}$	$1,051 \times 10^{-4}$

Таблица 4 – Результаты расчета параметров сигнала (Задержки)

Параметр	Ед. изм.	$\varphi = \pi$	$\varphi = 0$	$\varphi = 2\pi$
EX	дБ	6,666	6,867	6,666
$\sigma_1$		$0,1667 \times 10^{-9}$	$1,167 \times 10^{-9}$	$0,1667 \times 10^{-9}$
$\sigma_0$		$0,1667 \times 10^{-9}$	$0,333 \times 10^{-9}$	$0,1667 \times 10^{-9}$
Q		11,121	11,451	11,121
$E_{\min}$	Вт	$0,355 \times 10^{-9}$	$5,444 \times 10^{-9}$	$0,355 \times 10^{-9}$
BER		$1,604 \times 10^{-4}$	$9,303 \times 10^{-5}$	$1,604 \times 10^{-4}$

На основе полученных данных, наиболее эффективным был выбран метод на основе решетки Брэгга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была поставлена и достигнута цель – изучены технологий полностью оптического преобразования форматов сигналов в оптических сетях. Для достижения цели были поставлены и выполнены следующие задачи:

- 1) проведен анализ состояния предметной области;
- 2) определен наиболее эффективный программный инструментарий для проведения исследования;
- 3) построены модели трех методов полностью оптического преобразования формата сигнала RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK;
- 4) проведен анализ результатов исследования методов полностью оптического преобразования формата сигнала из RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK.

В ходе решения первой задачи был проведен анализ существующих исследований на глубину проработанности проблемы. Во время проведения анализа были рассмотрены зарубежные публикации на тему полностью оптического преобразования формата сигнала, в результате чего был сделан вывод о наличии хорошо проработанной математической базы для данного направления, а также наличие большого количества средств для проведения дальнейших исследований. Зарубежные исследования в данной области ведутся и в наше время, однако отечественных публикаций на данную тему недостаточно для проведения каких-либо исследований.

При решении второй задачи было проведено сравнение функционала двух программных пакетов, используемых для имитационного моделирования оптических сетей связи. Рассмотренными программными пакетами являются программные комплексы MATLAB Simulink и OptiSystem. Был проведен обзор функциональных возможностей данных программных пакетов, в результате которого, для проведения дальнейших исследований был сделан выбор в пользу программного комплекса MATLAB Simulink. Также был проведен обзор особенностей моделирования оптических волоконных сетей связи. Были рассмотрены факторы, воздействующие на распространение сигнала в оптическом волокне, модуляция и используемые в ВОСП линейные коды. Был проведен анализ особенностей формирования модулированных сигналов с форматом RZ, CSRZ и влияния данных форматов на производительность системы передачи. Также была рассмотрена дифференциальная фазовая манипуляция и особенности применения данного типа манипуляции в ВОЛС и рассмотрено моделирование сигналов различных форматов в программном комплексе MATLAB Simulink.

Результатом выполнения третьей задачи стала смоделированная экспериментальная схема полностью оптического преобразования формата сигнала, смоделированная в пакете MATLAB Simulink. Данная схема состоит из трех основных блоков: генератора оптического RZ-DQPSK сигнала, модели

одномоводного ОВ и блока преобразования и анализа сигнала. В блоке преобразования и анализа присутствуют три блока полностью оптического преобразования сигнала, основанные на трех методах: на основе фильтра с решеткой Брэгга, на основе интерферометра Маха-Цендера и на основе фильтра задержки. В данном блоке также были смоделированы средства для рассмотрения формы сигнала с помощью временной осциллограммы импульсов, анализа спектра сигналов и сравнения спектров исходного и преобразованных сигналов.

В рамках решения четвертой задачи был проведен анализ глаз-диаграммы преобразованного сигнала и проведен расчет параметров сигнала на основе данных, полученных при анализе глаз-диаграммы. По данным расчета была проведена оценка эффективности сравниваемых методов преобразования сигнала, в результате которой наиболее эффективным был выбран метод на основе решетки Брэгга.

Научная значимость магистерской диссертации заключается в полученных результатах исследования методов полностью оптического преобразования форматов сигналов RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK в волоконно-оптических сетях связи и сравнении эффективности рассмотренных методов.

Практическая ценность состоит в повышении эффективности методов преобразования форматов сигналов RZ-DQPSK в NRZ-DQPSK в волоконно-оптических сетях связи без электрического преобразования оптического сигнала.

На основе полученных данных можно сделать рекомендацию по использованию данного метода полностью оптического преобразования формата сигнала в полностью оптических сетях связи.