

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**(ФГБОУ ВО «КубГУ»)**  
**Физико-технический факультет**

**Кафедра оптоэлектроники**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ В  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Работу выполнил \_\_\_\_\_ Куликов Евгений Вячеславович

Курс 3

Направление 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук \_\_\_\_\_ А. С. Левченко

Нормоконтролер

преподаватель \_\_\_\_\_ В. Е. Лысенко

Краснодар 2018

## РЕФЕРАТ

Курсовой проект 40 страниц, 30 рисунков, 1 таблица, 13 источников.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ, OPTISYSTEM, ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ, ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, OQPSK, ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЛОКНЕ, DPSK, QPSK, DP-QPSK.

Объектами исследования данной курсовой работы являются современные перспективные форматы модуляции в оптических системах связи, с помощью которых возможно увеличение скорости и значительное удешевление стоимости передаваемой информации.

В качестве объекта исследования используются различные схемы модуляции, разработанные и смоделированные в специализированном программном обеспечении – OptiSystem.

Целью данной курсовой работы является исследование современных форматов модуляции в ВОСП.

В результате выполнения курсовой работы освещены принципы работы современных форматов модуляции, исследованы такие форматы, как: QPSK, DPSK. Проведено моделирование их работы в программной среде OptiSystem по таким параметрам, как мощность, фаза, оптический спектр и коэффициент битовых ошибок (Глаз – диаграмма).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Общие сведения о форматах модуляции .....	6
1.1 Технологии модуляции .....	6
1.2 Применяемые форматы .....	9
1.2.1 Форматы с амплитудной модуляцией .....	9
1.2.2 Форматы с фазовой модуляцией .....	14
1.1.3 Смешанные амплитудно-фазовые форматы .....	17
2 Подробное рассмотрение фазовых форматов модуляции .....	19
2.1 QPSK .....	19
2.2 D-QPSK .....	21
3 Исследование экспериментальной оптической системы с DP-QPSK на скорости в 100 Гбит/с .....	25

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире системы связи стали одной из основ развития общества. Спрос на услуги связи растёт с геометрической прогрессией. Отсюда и высокие требования к современным сетям связи. Общеизвестно, что обеспечить человечество достойным качеством связи на данный момент возможно только при помощи оптического волокна.

Но даже в век высокоскоростных волоконно-оптических линий передачи данных есть куда стремиться. Главной задачей сейчас остаётся увеличение протяжённости ВОСП, уменьшения их общей стоимости и стоимости единицы передаваемой информации, а также увеличение спектральной эффективности (эффективность использования спектра для передачи информации) DWDM-систем.

В достижении данной цели большую роль играют современные прогрессивные форматы модуляции оптических сигналов. К данным сигналам предъявляются ряд серьёзных требований, который обусловлен спецификой назначения того или иного сигнала.

К данному ряду требований относятся такие, как: наиболее эффективно используемая полоса частот; максимальная помехоустойчивость оптического канала; защищённость от линейных и нелинейных искажений; гибкость системы (возможность гибкой настройки передатчиков); стабильность; экономическая эффективность и т.д.

Изучение воздействия различных форматов модуляции на оптические сигналы на практике ограничено сложностью и дороговизной оборудования. Однако, благодаря современному программному обеспечению (OptiSystem, ModeSYS, OptiSim, OptiSPISE, PHOTOSS и т.д.) стало возможным доскональное изучение всех физических процессов, протекающих в ВОЛС.

Целью курсового проекта является изучение нескольких современных форматов модуляции, перспективных для использования в ВОСП. Также,

необходимо провести анализ полученных результатов по мощности, фазе, оптическому спектру и коэффициенту битовых ошибок оптического сигнала.

Перспективность использования современных форматов модуляции зависит от конкретных методов их интеграции в существующие технологии передачи данных, поэтому, исследование работы систем с использованием различных форматов модуляции и выявлении оптимальных соотношений применяемых форматов с технологией конфигурации системы является весьма актуальным. Основным источником информации к данной работе были англоязычные статьи из научных журналов, специализированные зарубежные сайты, а также сайты производителей программного обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: изучить основы перспективных форматов модуляции оптических сигналов в ВОСП, спроектировать принципиальные схемы в среде OptiSystem для визуализации воздействия исследуемых форматов на оптический сигнал.

## **1. Общие сведения о форматах модуляции**

### **1.1 Технологии модуляции оптических сигналов**

Рост потребности в скорости и объеме передаваемой информации поставил задачу увеличения пропускной способности DWDM – систем связи. Появилась необходимость в повышении спектральной эффективности DWDM систем и более рационального использования рабочего спектра (уменьшение межканального расстояния и увеличения канальной скорости). Но современные DWDM – системы на скоростях 40 Гбит/с и выше не могут работать с традиционными амплитудными форматами модуляции, поэтому появилась острая необходимость в совершенно новых модулирующих форматах для наиболее эффективного использования потенциала DWDM.

На данный момент существует 3 основных технологии модуляции оптического сигнала: DML (Directly Modulated Lasers) – Лазер с прямой модуляцией; EAM (Electroabsorption Modulators) – Электроабсорбционный модулятор (Электропоглощающий); MZM (Mach–Zehnder Modulators) – Модулятор Маха - Цандера

DML – простейший вид модуляции оптического сигнала. Модулирующий сигнал управляет мощностью оптической несущей (лазер модулируется током напрямую). Является бинарной модуляцией и эффективно применяется в сетях связи на скоростях не выше 10Гбит/с.

Основным ограничивающим фактором DML является Чирпинг – эффект. Это паразитное явление, являющееся остаточной фазовой модуляцией, вызванное амплитудной модуляцией. Данный эффект уширяет оптический спектр, ограничивая расстояние между DWDM – каналами. Также может взаимодействовать с хроматической дисперсией в волокне, тем самым увеличивая искажения сигнала.

ЕАМ – Электроабсорбционный модулятор. Основан на принципе изменение параметров прозрачности некоторых материалов под действием электрического поля, создаваемого источником модулирующего сигнала (Эффект Франца-Келдыша). Данный модулятор хорошо работает на скоростях от 40 Гбит/с до 80 Гбит/с.

МЗМ – Модулятор Маха-Цандера (рисунок 1). В отличие от Электроабсорбционного модулятора, работа данного модулятора основана на принципе интерференции.

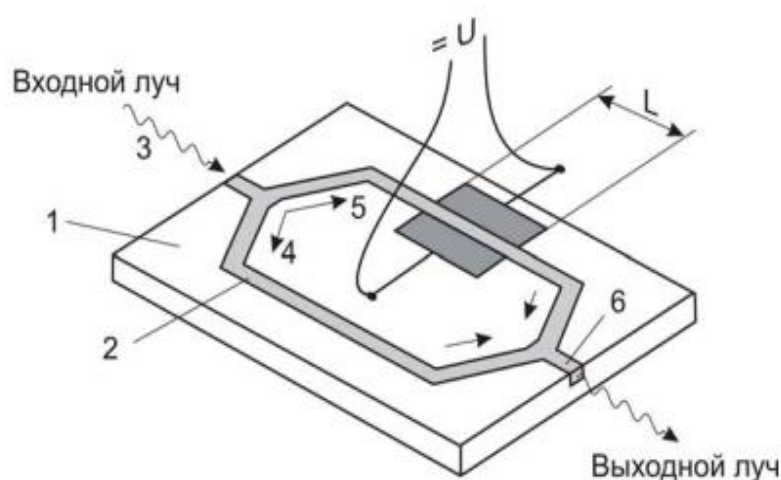


Рисунок 1 – модулятор Маха-Цандера (МЗМ) в разрезе

Входящий световой поток раздваивается. Одно колено модулятора имеет фазовый модулятор, который задает разницу фаз оптических сигналов, контролируемую внешним напряжением. На выходной муфте данные сигналы встречаются и в зависимости от того, какое напряжение было подано на фазовый модулятор, после взаимной интерференции данных сигналов на выходе получают логические 1 либо 0. На данный момент Модуляторы Маха – Цандера являются наиболее удобными для реализации различных форматов модуляции. Наиболее удобно реализованы на  $\text{LiNbO}_3$  [1].

Несмотря на разнообразие способов модуляции оптических сигналов, необходимо строго удовлетворять требованиям, предъявляемым к

формируемым сигналам. Данные требования обусловлены расстояниями, на которых будет происходить передача данных, областью применения систем, требованиям к скоростным режимам, технико-экономическим показателям и т.д.

К данному ряду требований относятся такие, как: наиболее эффективно используемая полоса частот оптического канала (наибольшее число информационных бит в единицу времени); максимальная помехоустойчивость оптического канала (т.е. нормальная работоспособность оптического канала при минимальном OSNR); защищённость от линейных (хроматическая и поляризационные дисперсии) и нелинейных (ФСМ, ФКМ, ВКР, ВРМБ, ЧВС) искажений; гибкость системы (возможность гибкой настройки передатчиков); стабильность характеристик модулированных сигналов; экономическая эффективность и т.д.

Удовлетворять подобному жёсткому ряду требований могут только оптические передатчики с внешней модуляцией излучения одномодовых узкополосных лазеров. Параметрами модуляции оптического излучения могут быть: амплитудное значение, фаза излучения, фаза импульсной посылки, частота излучения, кодовое наложение на излучение и т.д.



## 1.2 Применяемые форматы модуляции

### 1.2.1 Форматы с амплитудной модуляцией

В виду дешевизны и простоты реализации зачастую применяют амплитудные форматы модуляции (ASK – Amplitude Shift Keying). Основной модулируемый параметр – амплитуда оптического сигнала. При амплитудной модуляции в системах оптической связи осуществляется изменение мощности оптического излучения передатчика. Является первым и самым распространенным из форматов модуляции оптического сигнала т.к. является самым простым для реализации – получается при прямой модуляции током накачки лазера. Существует 2 вида амплитудной модуляции – прямая и внешняя [12].

При прямой модуляции в передатчиках, в соответствии с информационной последовательностью, модулируется ток накачки (рисунок 2). Под действием модулированного тока накачки меняется мощность излучения лазера в соответствии с информационной битовой последовательностью.

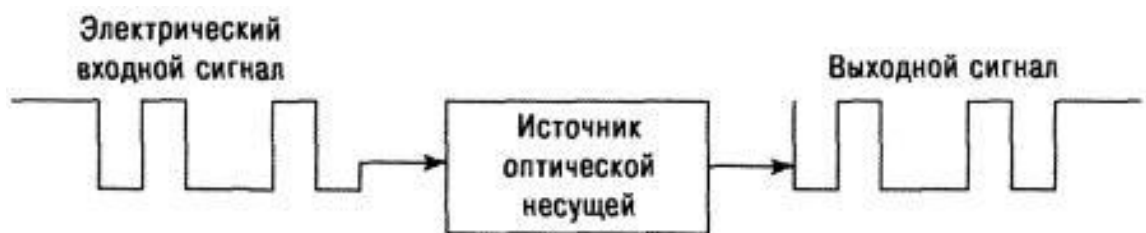


Рисунок 2 – Схема передатчика с прямой модуляцией

Данный способ является преобладающим на скоростях передачи данных до 2,5 Гбит/с. На скоростях свыше 2,5 Гбит/с наблюдается серьезное влияние чирпа, которое приводит к серьезным искажениям и расплыванию сигнала. Но несмотря на негативное влияние чирпинг – эффекта, можно повысить скорость передачи до 10 Гбит/с используя структурированные импульсы накачки,

волокна с отрицательной дисперсией и лазеры специальной конструкции. Однако, при использовании амплитудной модуляции на скоростях до 10 Гбит/с, дальность передачи и спектральная эффективность системы связи даже на современном оборудовании далеки от оптимальных.

Данную проблему может решить использование передатчиков на основе лазеров с непрерывной накачкой и внешней модуляцией (рисунок 3).



Рисунок 3 – Схема передатчика с внешней модуляцией

Самым популярным амплитудным форматом является формат без возвращения к нулю – NRZ (Non Return to Zero). Сигнал, соответствующий логической единице формируется оптическим импульсом, длительность которого равна периоду следования символов, а нулю соответствует отсутствие оптического сигнала или сигнал, уровень которого меньше уровня логической единицы. На рисунке 4 представлены мощность, фаза, оптический спектр, ай-диаграмма и схема формирования оптического сигнала при NRZ – кодировании с амплитудной модуляцией.

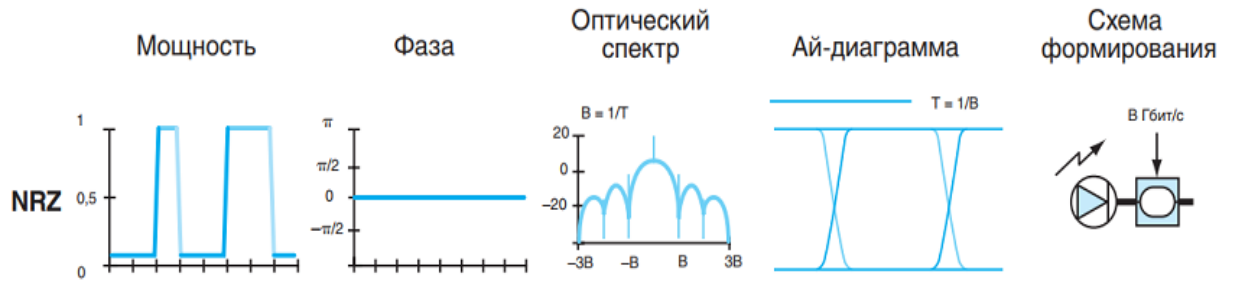


Рисунок 4 – Характеристики сигнала при NRZ кодировании с амплитудной модуляцией

Для реализации данного вида модуляции достаточно применения одного модулятора MZ (Маха-Цандера) (рисунок 5). Меняется амплитудное значение (б), но остается неизменной фаза импульсов (в)

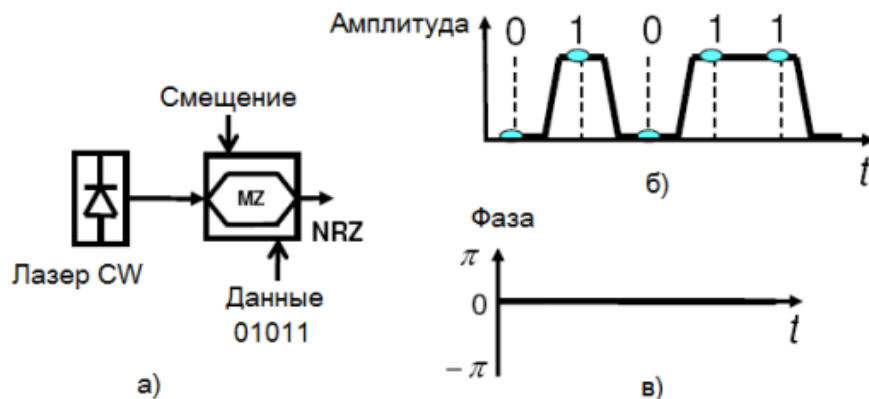


Рисунок 5 – Формирование оптического сигнала NRZ на выходе модулятора

RZ – Return to Zero формат с “возвращением к нулю” (рисунок 6). Логическая единица представляет собой импульс, длительность которого может варьироваться, но всегда меньше периода следования символов. В сетях связи на скоростях до 10 Гбит/с данный формат получил широкое распространение по причине высокой устойчивости к нелинейности волокна. Кроме того, у сигналов RZ модулированных сигналов есть дополнительная

устойчивость к поляризационно – модовой дисперсии, которой NRZ – сигналы не обладают.

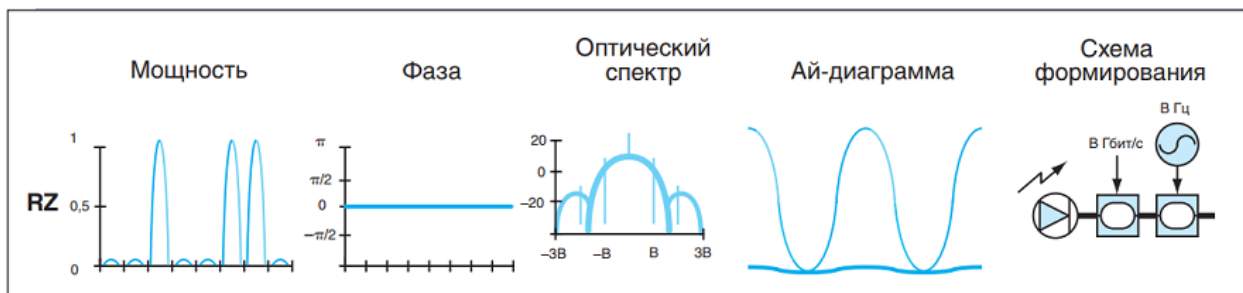


Рисунок 6 - Характеристики сигнала при RZ кодировании с амплитудной модуляцией

Для формирования оптического сигнала с RZ кодированием и амплитудной модуляцией необходимо воспользоваться дополнительным модулятором MZ (рисунок 7). В данном модуляторе сигнал в формате NRZ преобразуется в импульсы с возвратом к нулю.

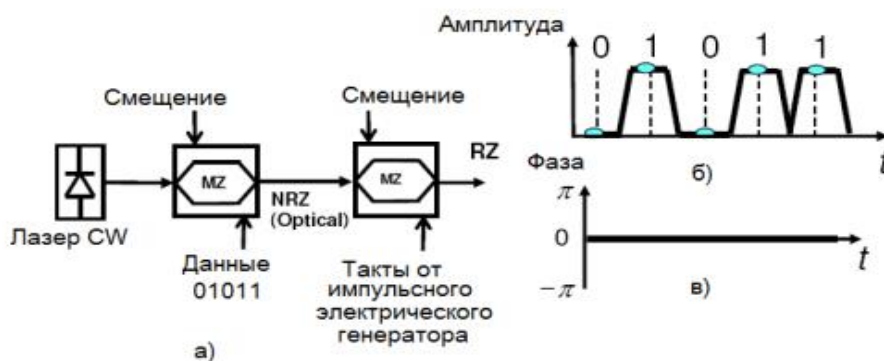


Рисунок 7 - Формирование оптического сигнала RZ

Несмотря на успех двух предыдущих форматов, наиболее успешным является chirпированный (содержащий частотную модуляцию) RZ формат амплитудной модуляции (CRZ). Он формируется при прохождении RZ сигнала через фазовый модулятор, на который подается периодический сигнал на частоте следования информационных сигналов. У сигнала в формате CRZ

спектр шире, чем у RZ-сигнала, что ограничивает максимально достижимую спектральную эффективность и, таким образом, пропускную способность. Однако этот формат получил широкое распространение в 10 Гбит/с системах, потому что он значительно более устойчив к нелинейным эффектам.

Для реализации CRZ необходимо включение третьей ступени модуляции, которая будет вносить предискажения для частичной компенсации дисперсионных искажений в протяженной волоконной линии посредством использования внешнего электрического сигнала.

## 1.2.2 Форматы с фазовой модуляцией

Фазовые форматы модуляции нашли применение в системах связи на скоростях свыше 10 Гбит/с. К наиболее распространённым относятся такие форматы как: BPSK, DPSK, QPSK, а также их разновидности с мультиплексированными ортогональными когерентными лучами от одного источника – PM-волны (PM-BPSK, PM-DPSK, PM-QPSK). PM – волны удваивают пропускную способность канала за счет деления одного высокоскоростного потока данных на два параллельных. Также, применение фазового кодирования способствует снижению физической скорости импульсов. А это означает, что снижается и требуемая полоса частот [12].

Одним из наиболее распространённых фазовых форматов является BPSK (Binary Phase-Shift Keying) – двоичная фазовая манипуляция (рисунок 8). В оптических линиях связи при формировании оптического BPSK – сигнала, импульсы биполярного двоичного сигнала управляют излучением MZM – лазера таким образом, что формируются оптические импульсы с чередованием фаз 0 и  $\pi$  (рисунок 9). Уровень мощности излучения в среднем сохраняется неизменным.

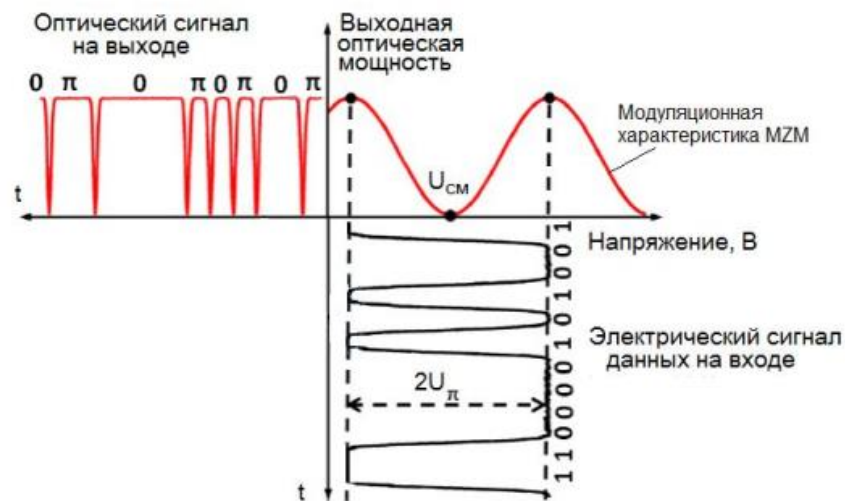


Рисунок 8 – Формирование оптического сигнала NRZ - BPSK

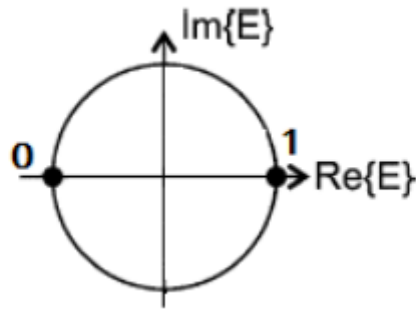


Рисунок 9 – Круговая диаграмма BPSK

Формат DPSK (Differential Phase Shift Keying) - дифференциальная (раздельная) фазовая манипуляция, похожа на BPSK, в нём информация также содержится в разности фаз между двумя последующими импульсами, мощность излучения информации не несёт.

NRZ-DPSK – Дифференциальная фазовая модуляция без возврата к нулю. Прежде чем модулирующий сигнал попадает на модулятор он кодируется, что помогает избежать распространения ошибок, которые могут возникнуть при дифференциальном декодировании на приёмнике. На DPSK-прекодере NRZ-кодированная последовательность комбинируется с таким же сигналом, но задержанным на 1 бит (one-bit delay) (рисунок 10). После этого прекодер кодирует электрический сигнал, который и будет использован в модуляторе MZM для модуляции непрерывного оптического сигнала. Логическая “1” представляется изменением фазы на  $\pi$  и не меняется до тех пор, пока в последовательности не появится “0”. Логический “0” представлен отсутствием изменения фазы между последующими битами в оптическом носителе. Интенсивность сигнала остаётся неизменной.

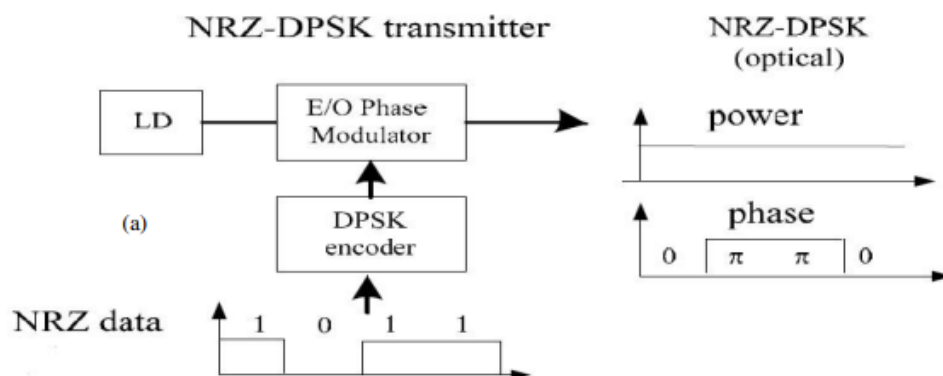


Рисунок 10 – Схема кодирования NRZ-DPSK сигнала

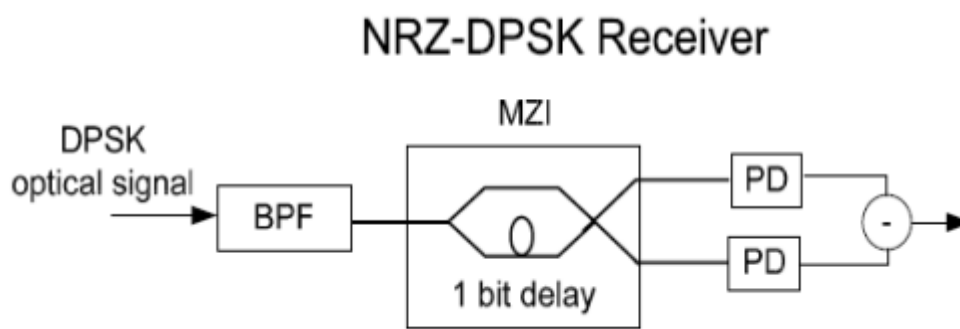


Рисунок 11 – Схема Модулятора Маха-Цандера с задержкой 1 бита

На выходе модулятора, принципиальная схема которого приведена на рисунке 11, присутствует 2 выхода – конструктивный и деструктивный (constructive port or destructive port) [9]. Если на модулятор поступают два последовательных симфазных сигнала – на конструктивном выходе получается высокий уровень сигнала. Но если поступает два не симфазных сигнала – низкий уровень сигнала.

При использовании в качестве приёмника двух, работающих параллельно фотодиодов позволяет существенно снизить вероятность ошибки. Таким образом повышается чувствительность на ~3 дБ.



### 1.1.3 Смешанные амплитудно-фазовые форматы.

Возможности амплитудных и фазовых форматов не могут удовлетворить постоянно растущую потребность в количестве передаваемой информации. На скоростях передачи свыше 40 Гбит/с, вследствие влияния дисперсии и чирпинг – эффекта, данные форматы становятся практически бесполезны. Их спектральная эффективность стремится к нулю.

С данными ограничениями хорошо справляются многоуровневые амплитудно-фазовые форматы модуляции – ASK-QPSK. Информация кодируется как амплитудой, так и фазой, таким образом данный формат успешно справляется с задачей повышения спектральной эффективности  $\gamma$  [3].

ASK-QPSK является сочетанием бинарного ASK и 4-символьного QPSK. Если рассмотреть круговую диаграмму (созвездие) сигнала, модулированного таким образом (рисунок 12), можно увидеть, что он содержит 8 уровней.

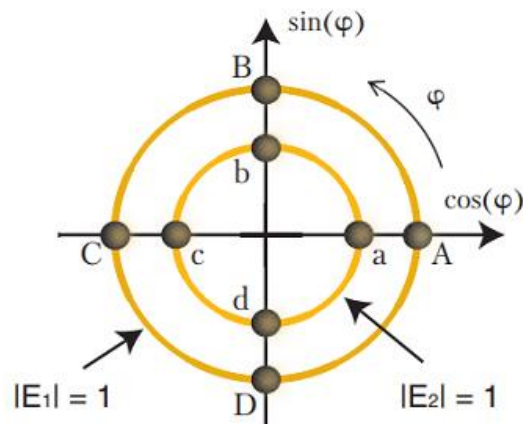


Рисунок 12 – Созвездие 8-символьного сигнала ASK-QPSK

Один символ содержит 3 бита информации. Отсюда следует, что скорость передачи бита получается в 3 раза выше скорости передачи закодированного символа. Сигнал имеет 3 2 уровня амплитуды и 4 уровня фазы.

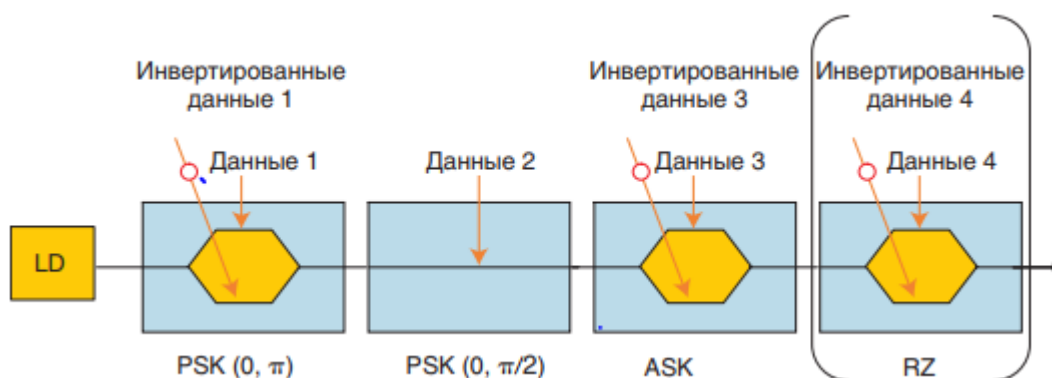


Рисунок 13 – Устройство передатчика ASK-QPSK

На рисунке 13 изображена принципиальная схема передатчика ASK-QPSK модулированного сигнала. двухтактный модулятор Маха –Цандера модулирует фазу непрерывной световой волны, выходящей из лазерного диода, заставляя ее принимать значения 0 или  $\pi$ . Оптический фазовый модулятор добавляет сдвиг фаз 0 или  $\pi/2$ . Таким образом, получается четырехуровневое фазовое кодирование. Следующим этапом добавляется NRZ или RZ амплитудное модулирование. Двухтактный модулятор Маха – Цандера, не вносящий чирпа, нужен для NRZASK-кодирования, аналогичный прибор превращает NRZ- в RZ-формат.

На границах бита RZ-ASK-QPSK мощность падает до нулевого значения, и поэтому этот формат наиболее устойчив к хроматической дисперсии.

## 2 Подробное рассмотрение фазовых форматов модуляции

### 2.1 QPSK

Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK – Quadrature Phase Shift). Сдвиг фазы на 90 градусов. Данный принцип модуляции подразумевает использования как синуса, так и косинуса для представления цифровых данных.

QPSK модулятор можно представить, как два параллельных BPSK. В то время, как каждый BPSK передаёт 1 бит данных на символ (per symbol rate), QPSK передаёт 2 бита на символ.

Схема QPSK представлена на рисунке 14.

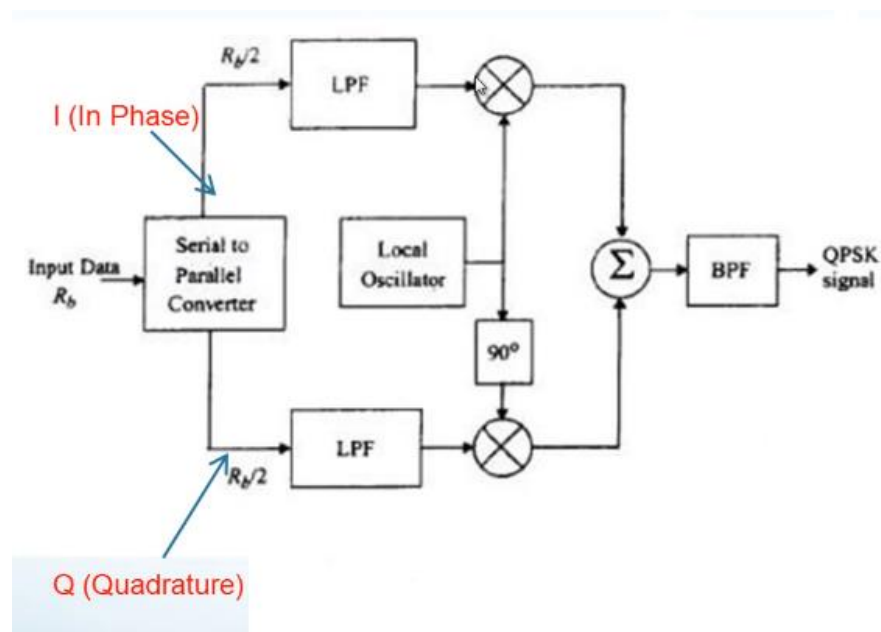


Рисунок 14 – Схематическое изображение QPSK-модулятора

Сигнал на входе поступает в Serial to Parallel-конвертер разделяет цифровой сигнал на две части – нечетная цифра (логическая 1) соответствует фазной части, а нечётное число (логический 0) представляется в квадратурной частию. Далее, гетеродин генерирует косинусоидальный сигнал ( $\cos\omega t$ )

который синхронизируется с фазными данными и создает I-сигнал (в этом случае логическая 1 представляется косинусом  $\cos\omega t$ ). Другая косинусоидальная волна, генерируемая гетеродином, получает квадратурный фазовый сдвиг на 90 [5].

Таким образом образуется синусоида, которая синхронизируется с квадратурной частью первичного сигнала, разделённого на входе, и в результате получается Q-сигнал (в данном случае логический 0 представляется  $\sin\omega t$ ).

После получения I и Q сигналов они объединяются в полноценный QPSK-сигнал. В фазной части  $\cos\omega t$  представляет логическую 1, а  $-\cos\omega t$  – логический 0. В квадратурной части  $\sin\omega t$  – логическая 1,  $-\sin\omega t$  – логический 0 (рисунок 15).

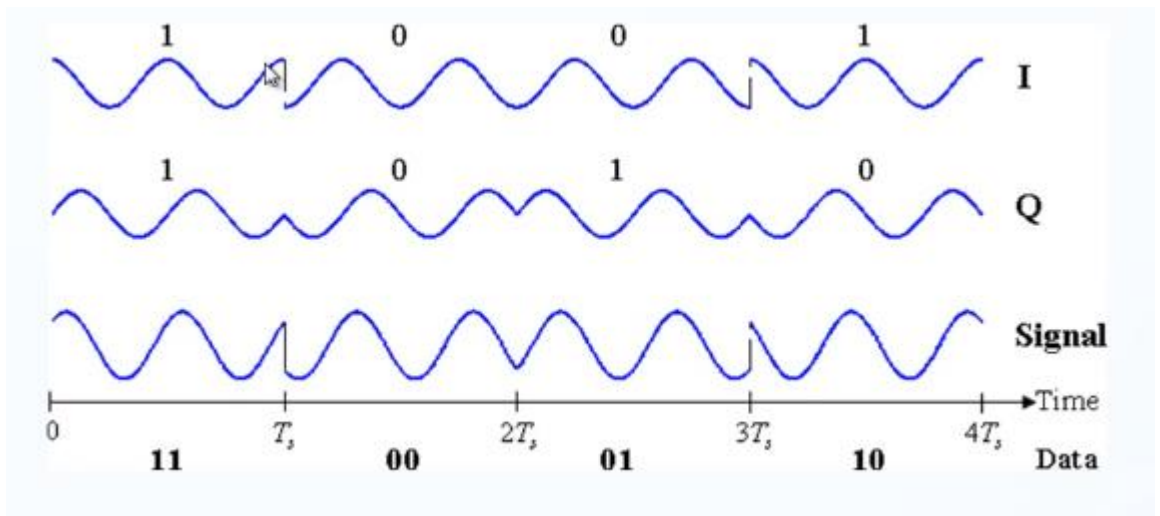


Рисунок 15 – формирование QPSK-модулированного сигнала из I и Q сигналов.

## 2.2 D-QPSK

Дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция (D-QPSK). Является многоуровневым форматом, интерес к которому в последнее время сильно возрос. Передача сигнала происходит с четырьмя фазовыми сдвигами:  $0, +\pi/2, -\pi/2, \pi$  со скоростью символа половины совокупной скорости.

Как и в случае с DPSK, DQPSK-передатчик наиболее эффективно реализуется на основе двух параллельных модуляторов Маха-Цандера (MZM), работающих, как фазовые модуляторы (рисунок 16).

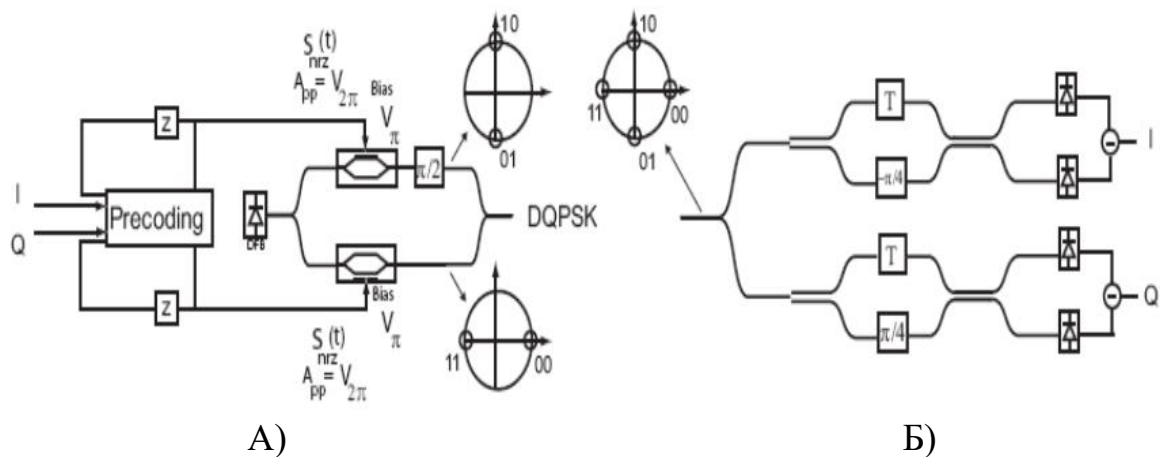


Рисунок 16 – Схема DQPSK модуляции. А) – Генерирующая часть, Б) – Детектирующая часть

Данная схема состоит из волоконного лазера непрерывного излучения; разветвителя, разделяющего световой поток на две части одинаковой интенсивности; двух модуляторов MZM, функционирующих как 2 фазовых модулятора; одного фазовращателя на  $\pi/2$ , размещённого после одного из MZM-модуляторов и одного оптического “комбайнера” (Объединитель).

Также на рисунке 16 показаны символьные “созвездия” для каждого из рукавов генерирующей части, а также для выхода “комбайнера” совместно с символьными переходами. Используя данный тип передатчика мы используем преимущества практически идеальных фазовых сдвигов на  $\pi$ . К тому же, данная

структура передатчика требует только двоичный управляющий сигнал, который гораздо легче генерировать на высоких скоростях чем многоуровневые. Также следует обратить внимание на тот факт, что форма оптического спектра DQPSK идентична форме DPSK-спектра, но спектр DQPSK уже по частоте в два раза за счёт уменьшенной вдвое скорости передачи символов для более стабильной битовой скорости. Подобный сжатый спектр крайне эффективен для повышения спектральной эффективности в DWDM-системах, а также увеличивается защищённость от хроматической дисперсии (CD).

На приемнике DQPSK сигнал сперва разделяется на две равные части (рисунок 17). Используя сбалансированные приемники с параллельными интерферометрами, настроенными с разной задержкой для одновременной демодуляции двух двоичных сигналов. Задержка интерферометра равна продолжительности символа что в два раза превышает длительность бита информации.

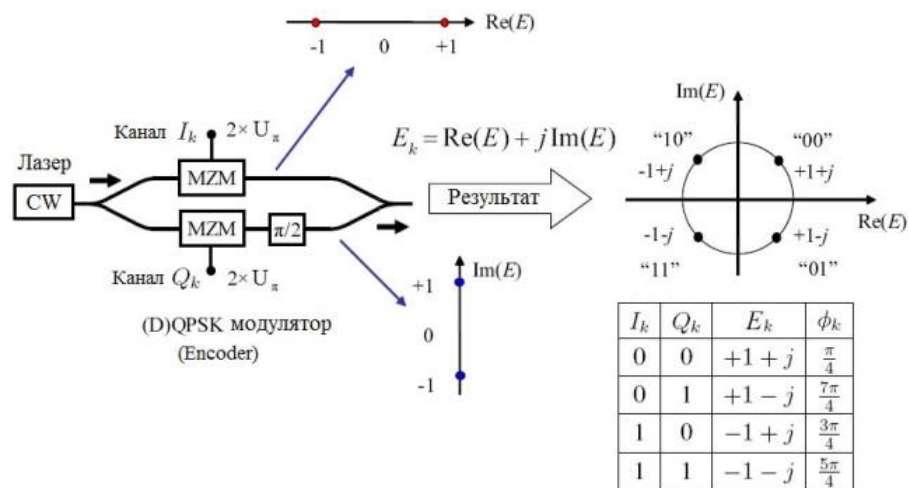


Рисунок 17 – Формирование фазовых позиций DQPSK

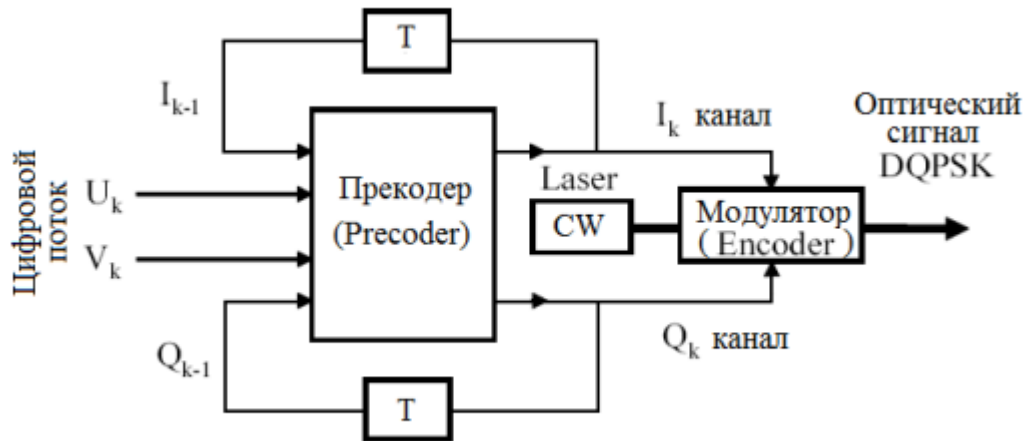


Рисунок 18 – Схема формирования модулирующих сигналов DQPSK

На выходе формируемые оптические импульсы в пиковом значении имеют идентичную мощность при всех фазовых состояниях (рисунок 18). Но при минимальной мощности переходы 00-10 и 00-01 мощность снижается до  $P/2$ . Только на переходах 00-11 формируется мощность близкая к нулю.

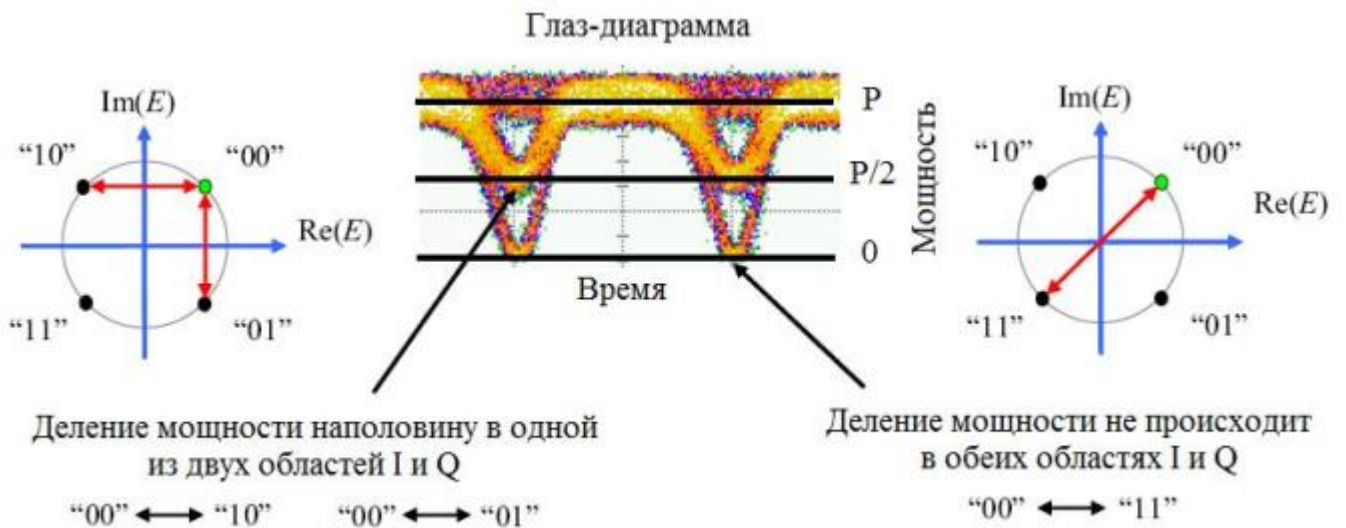


Рисунок 19 – Схема изменения мощности оптического излучения при DQPSK кодировании

DQPSK-кодирование наиболее эффективно на более узкой полосе частот т.к. на ней сосредоточена большая часть энергии. Спектральная эффективность при этом возрастает до 2 бит/с/Гц (рисунок 19). Для увеличения спектральной эффективности до 4 бит/с/Гц возможно использование двойной поляризации (DP-DQPSK), однако, недостатком является сложность реализации электронной схемы прецедера и оптического модулятора (данный формат наиболее эффективно применяется на скоростях около 100 Гбит/с).

Число фазовых состояний также может быть увеличено с 4-х до 8, 16, 32, 64 и далее. Кодированное состояние фазы потребует уже 3 бита. Однако, подобная технология не получила распространение в оптических системах связи вследствие низкой устойчивости к дисперсионным потерям.



### **3 Исследование оптической системы с DP-QPSK на скорости в 100 Гбит/с**

#### 100 Gbps DP-QPSK System with Digital Signal Processing

Квадратурная фазовая манипуляция с двойной поляризацией (DP – QPSK dual polarization quadrature phase shift keying).

Это специальная техника модуляции оптического сигнала в волоконной оптике, которая использует 2 ортогональные поляризации лазерного луча с QPSK на каждую поляризацию.

QPSK может передавать 2 бита информации per symbol rate. DP-QPSK увеличивает число бит до четырёх. В таком случае, для систем, работающих на скоростях 100 Гбит/с, необходимо передавать 25-28 тысяч символов в секунду. Но поскольку каждый символ передаёт 4 бита информации, то электронике нет необходимости работать на частоте в 100 ГГц, достаточно всего от 25 до 28 ГГц, что является экономически выгодным для применения в ВОЛС. Стоимость оптоэлектронных компонентов в данном случае также будет значительно ниже.

Рассмотрим систему 100 Гбит/с DP-QPSK с цифровой обработкой сигнала (рисунок 20). Данная система приведена на рисунке ниже. Она представляет из себя 5 основных частей: DP-QPSK трансмиттер, отрезок волоконной линии, когерентный оптический ресивер, модуль цифровой обработки сигнала и приёмо-декодирующее устройство.

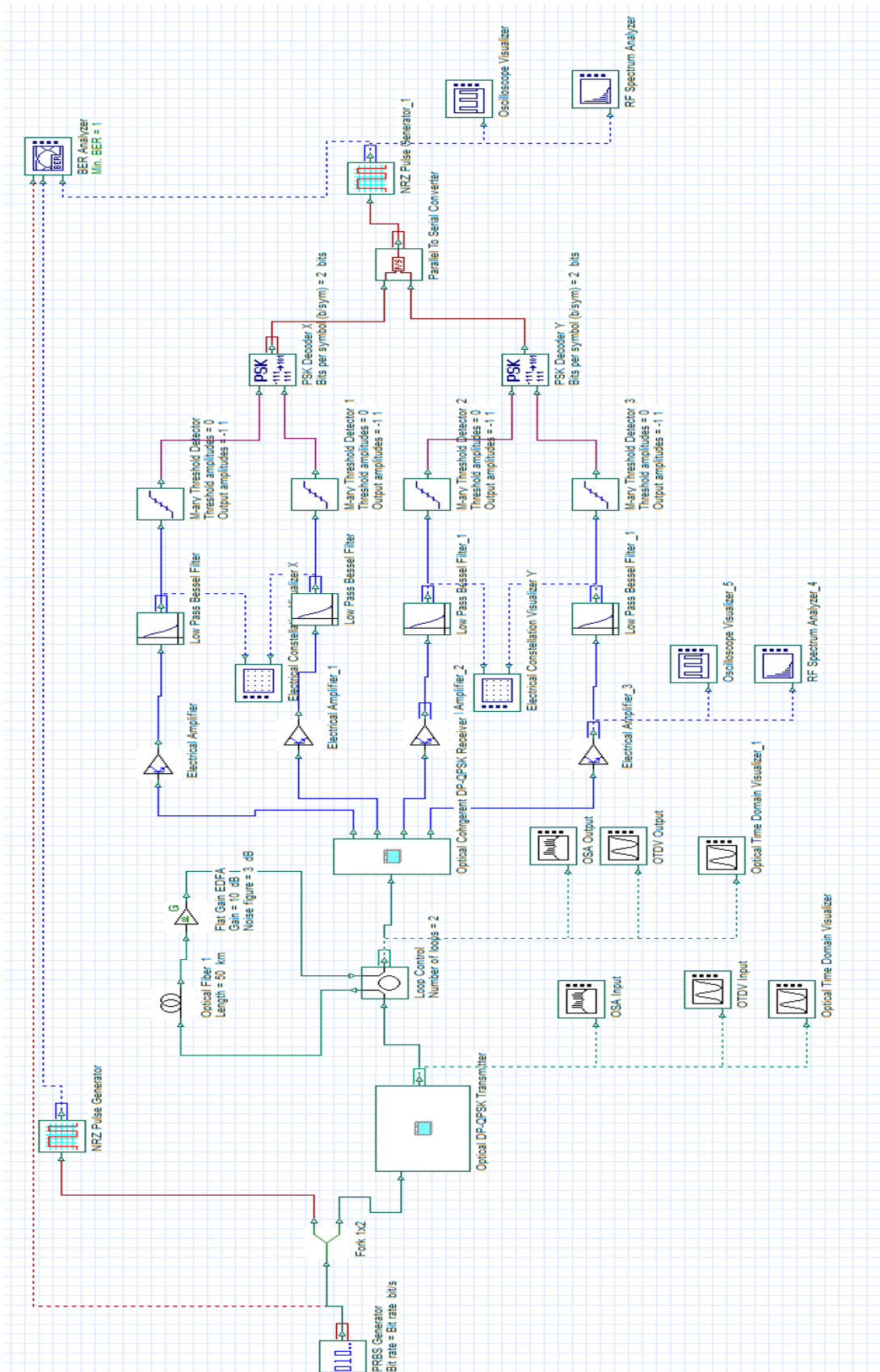


Рисунок 20 - Схема 100 Гбит/с DP-QPSK с цифровой обработкой сигнала

Сигнал генерируется оптическим DP-QPSK трансмиттером, который в данной схеме представлен подсистемой из отдельных компонентов. После генерации оптический сигнал распространяется по оптическому волокну, где претерпевает влияние дисперсии и поляризации. В данной схеме используется 100 километровая линия с двумя усилителями накачки в 10 дБ.

Пройдя волоконную линию сигнал попадает на когерентный оптический приемник, который также представлен в виде подсистемы из отдельных элементов. Здесь оптический сигнал оцифровывается и попадает на модуль цифровой обработки для компенсации влияния нелинейных эффектов, воздействовавших на сигнал в волоконной линии.

Разберём схему трансмиттера более подробно. Она представлена на рисунке 21. В качестве источника сигнала используется простой генератор псевдо - случайных последовательностей. Данный цифровой сигнал подаётся на оптический передатчик DP-QPSK. Данный передатчик на схеме выполнен, как отдельная подсистема (рисунок). Это сделано для наглядного отображения процессов, происходящих при DP-QPSK модуляции.

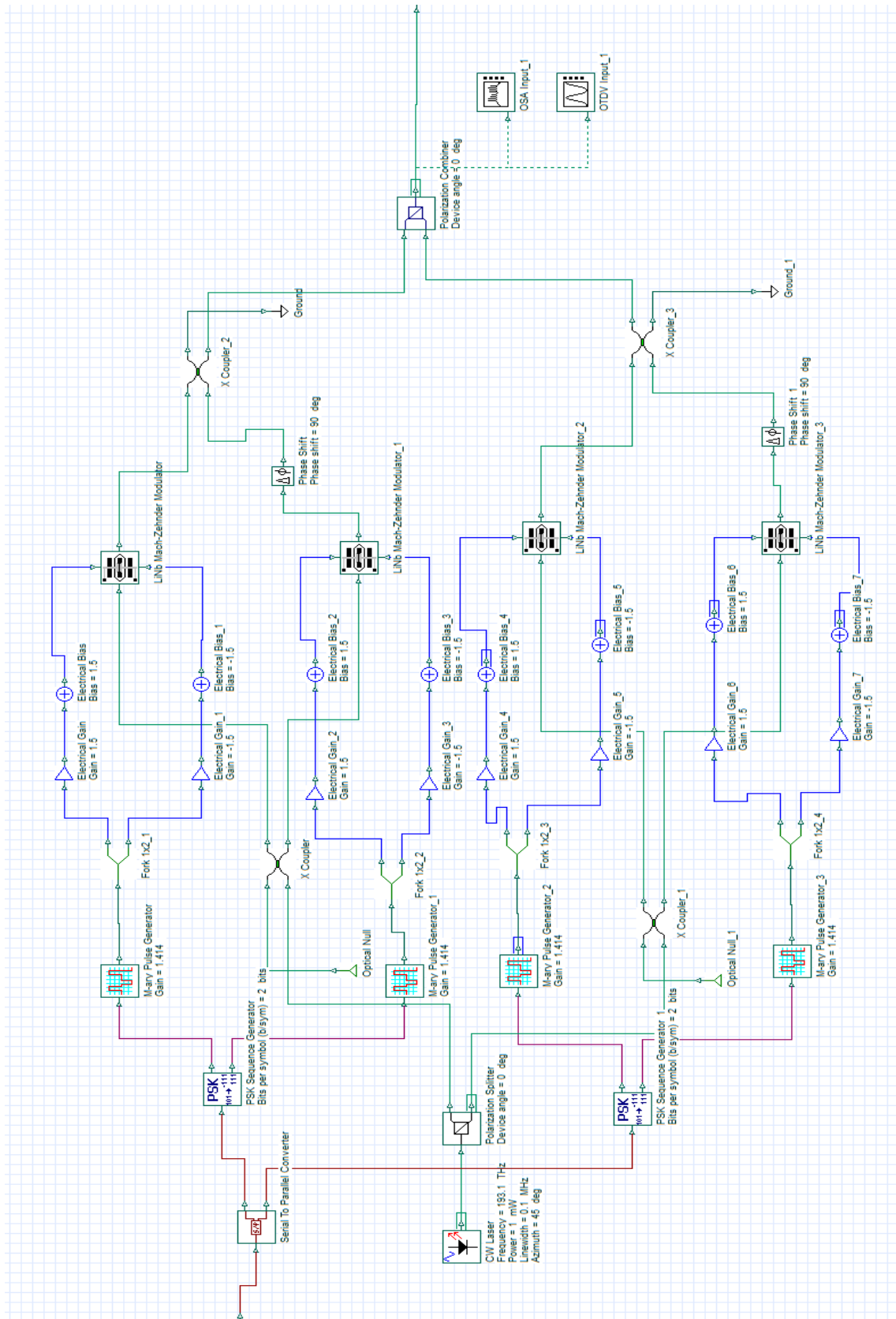


Рисунок 21 - схема DP-QPSK трансмиттера

Рассмотрим подробную схему DP-QPSK трансмиттера. Сгенерированная псевдо-случайная последовательность попадает на конвертер (serial to parallel converter), где претерпевает разделение на 2 части по битовой скорости (оба выходных сигнала в 2 раза медленнее, чем входящий).

В качестве носителя моделируемого сигнала используется лазер непрерывного излучения (CW Laser), настроенный на частоту в 193.1 ТГц и углом линейной поляризации в 45 градусов.

Данный оптический сигнал разделяется на 2 путём прохождения через специальный сплиттер поляризации. На выходе получаются 2 сигнала с разной поляризацией. Сплиттер самостоятельно разделяет сигнал на 2 компоненты с разной поляризацией.

После разделения сплиттером, оптические сигналы с разной поляризацией попадают на модуляторы Маха-Цандера (MZM). На этом этапе необходимо подвести к модулятору, непосредственно, модулирующий сигнал, в качестве которого будет использован ранее рассмотренный цифровой сигнал, разделённый конвертером. Но, прежде чем попасть на модулятор, данную цифровую последовательность необходимо пропустить через генератор символьной последовательности PSK (PSK-Sequence Generator). Данное устройство генерирует из входного двоичного сигнала две многоуровневые последовательности (M-ary) при помощи фазовой модуляции. При модуляции происходит кодирование 2 бита на символ со смещением начальной фазы на 45 градусов. При данном виде кодирования получится 4 фазовых состояния.

$$\varphi_i = \left( \frac{2\pi}{M} (i - 1) + \theta \right), i = 1, 2 \dots M$$

В данной формуле число M представляет собой количество возможных цифровых последовательностей, рассчитывающееся по формуле

$$M = 2^h$$

Здесь число  $h$  – количество бит на символ. В данной схеме это число равно 4. Отсюда следует, что на выходе генератора получаются 4 фазовых состояния (таблица 1).

Bit sequence	I	Q
00	1	0
01	0	1
10	-1	0
11	0	-1

Таблица 1 – Фазовые состояния I и q

Модулированный PSK M-ary сигнал поступает на M-ary Pulse Generator – генератор многоуровневых импульсов. Он генерирует на своем выходе электрический сигнал, соответствующий входной M-ary последовательности для дальнейшего использования в качестве модулирующего сигнала для модулятора Маха-Цандера.

Теперь на MZM поступает как оптическая несущая, так и модулирующий сигнал. Т.к. рассматриваемая схема использует двойную поляризацию, используется сразу 4 модулятора Маха-Цандера (по 2 на каждую поляризацию). Таким образом мы получаем возможность кодировать сигнал большим количеством фазовых состояний, что повышает эффективность системы.

На выходе из модуляторов, по одному на пару, необходимо добавить небольшое устройство Phase Shift – фазовый сдвиг, которое добавляет задержку по времени выходного оптического сигнала для предотвращения проблем при детектировании сигнала. После добавления необходимой задержки оптические сигналы объединяются в поляризационном сумматоре (Polarization Combiner) и за счет задержки не смешиваются и не перекрывают друг друга.

На этом процесс создания двуполяризованного оптического сигнала с фазовой манипуляцией можно считать законченным. Далее происходит передача по обычному оптическому волокну длиной в 100 км с двумя усилителями EDFA (легированные эрбием), установленными на расстоянии 50 км друг от друга и обладающие усилением в 10 дБ (рисунок 22).

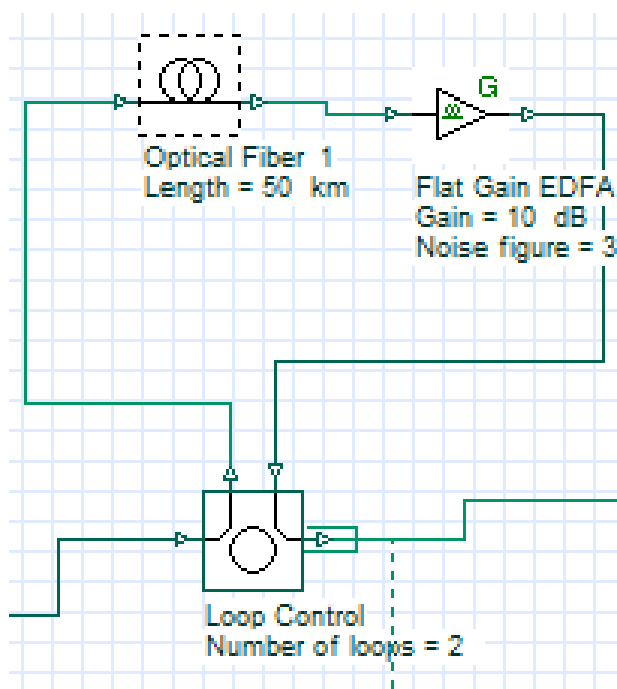


Рисунок 22 – схематическое изображение волоконной линии

При выходе из волоконной линии сигнал спектр оптического сигнала сужается и приобретает шумы (рисунок 23) [7]. Для визуализации данных эффектов воспользуемся такими визуализаторами, как: Оптический визуализатор временной области (Optical Time Domain Visualiser), Визуализатор оптического спектра (Optical Spectrum Analyser).

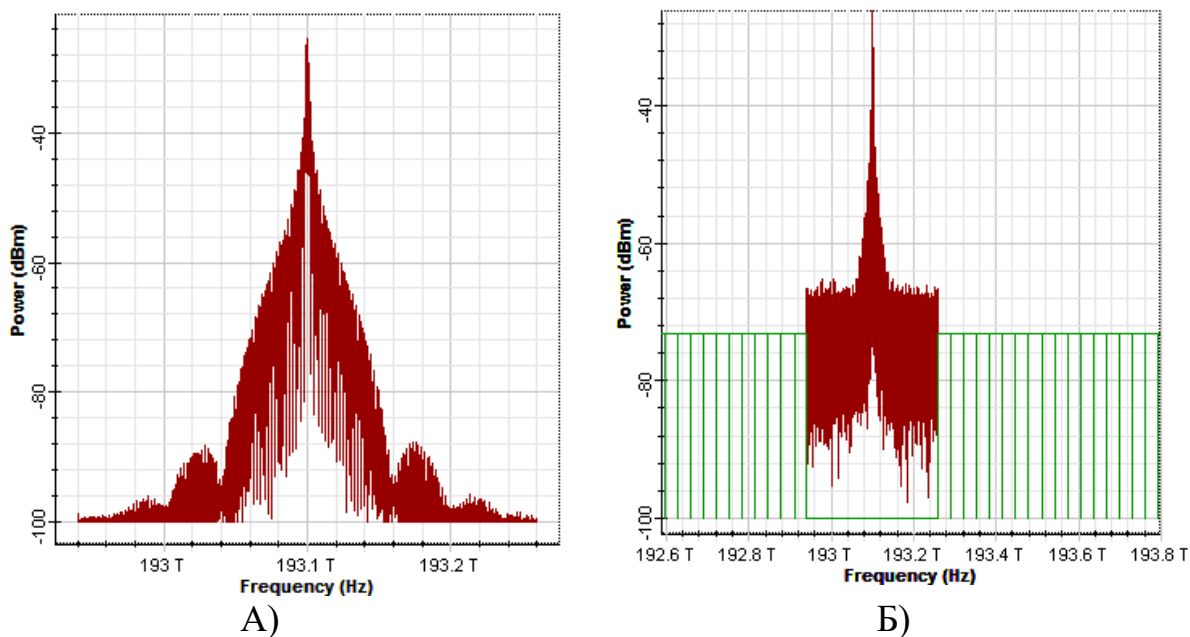


Рисунок 23 – спектры сигналов А) на выходе DP-QPSK трансмиттера Б) на выходе оптической линии

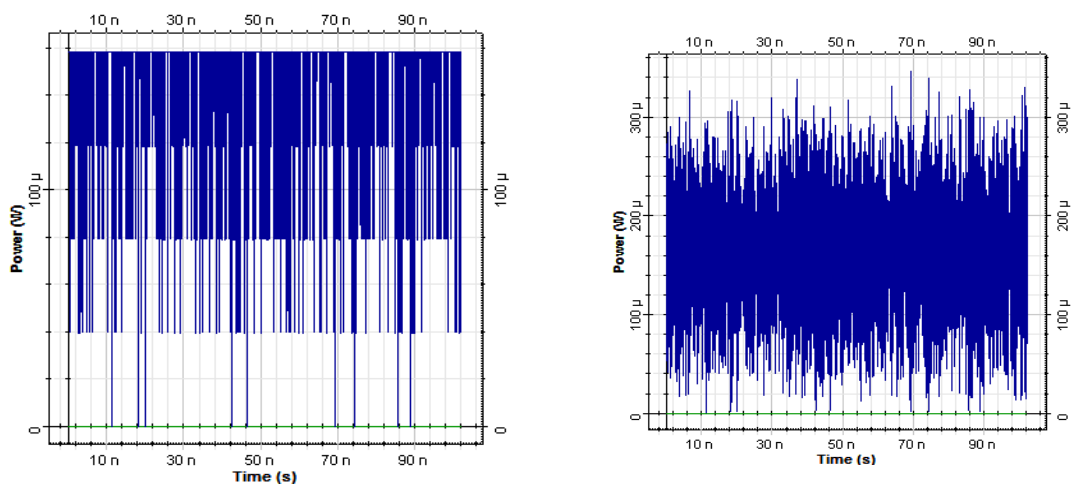


Рисунок 24 – результат моделирования визуализатора временной области (слева – до оптической линии, справа – после оптической линии)

Данный “зашумленный” сигнал попадает на когерентный оптический приёмник (Optical Coherent DP-QPSK Receiver) (рисунок 25). Этот компонент также можно представить в виде отдельной подсистемы.



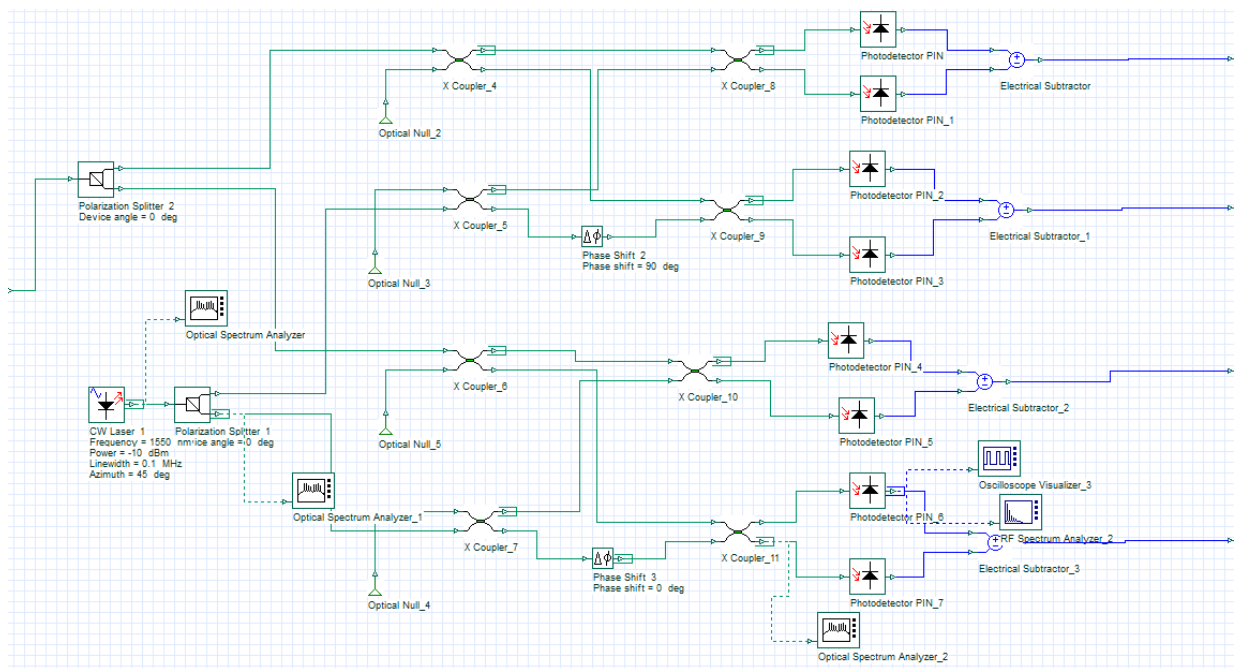


Рисунок 25 – Схема используемого DP-QPSK ресивера

Заметно сходство со схемой трансмиттера. Здесь оптический сигнал, прошедший через волоконную линию, снова разделяется на сплиттере. В ресивере установлен дополнительный источник оптического излучения, поляризованный на 45 градусов относительно первоначального сигнала. Оптические сигналы смешиваются на оптических муфтах и поступают на фотодетекторы для преобразования в электрический сигнал. В качестве фотодетектора используется система из фотодиодов.

На выходе PD-QPSK ресивера сигнал остаётся достаточно искаженным и с большим количеством шумов (рисунок 26).

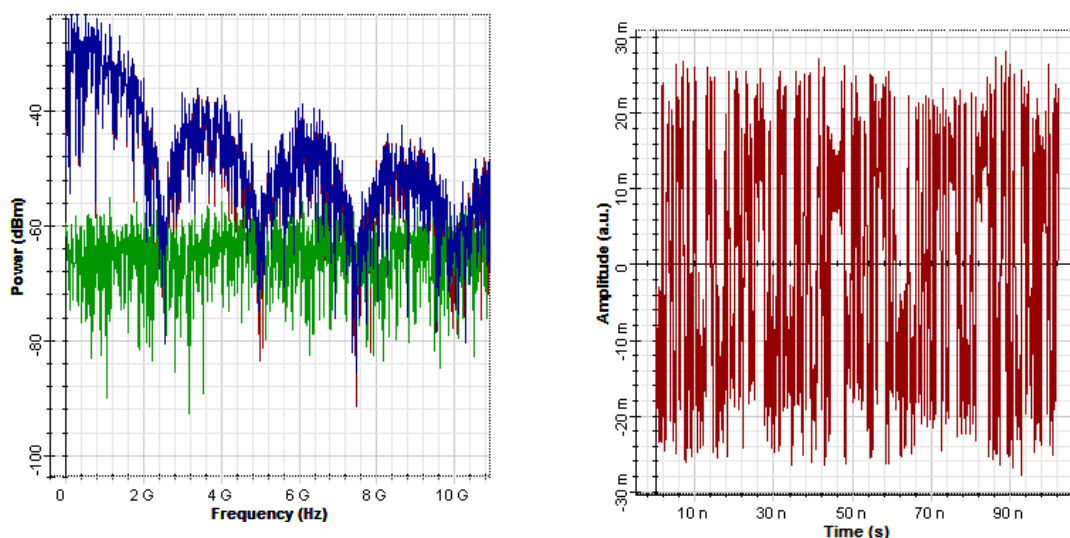


Рисунок 26 – Оптический спектр (слева) и осциллограмма (справа) сигнала на выходе ресивера

Для устранения возникших в ходе передачи шумов необходимо воспользоваться модулем цифровой обработки сигналов. Для этого в схеме предусмотрена система из следующих компонентов: электрический усилитель с усилением в 30 дБ, фильтр нижних частот Бесселя и многоуровневый пороговый детектор.

В первую очередь сигнал проходит перед усилением на электрическом усилителе. Далее он подаётся на фильтр Бесселя. Данный фильтр обладает наименее крутым спадом амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), чем у других линейных фильтров. Данный фильтр является наиболее приемлемым для обработки ступенчатого входного сигнала [8]. Фильтр Бесселя обладает фазовым сдвигом, пропорциональным частоте и максимально гладкой групповой задержкой (рисунок 27). Групповая задержка практически не меняется по частотам полосы пропускания, вследствие чего форма фильтруемого сигнала на выходе такого фильтра в полосе пропускания сохраняется практически неизменной. Данный фильтр убирает большую часть шумов.

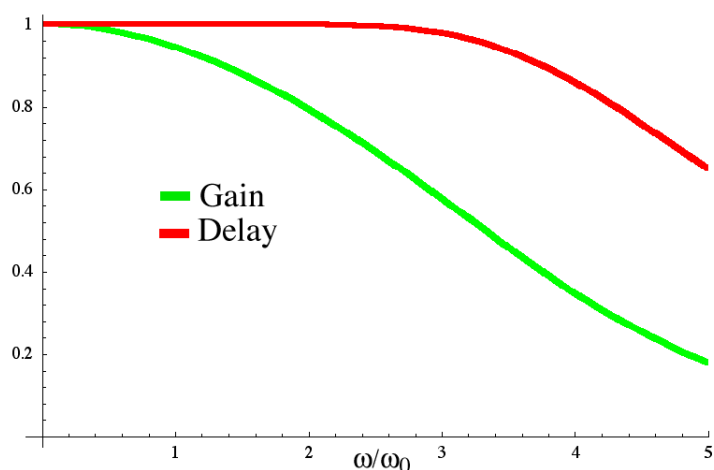


Рисунок 27 – График амплитудно-частотной характеристики и групповой задержки

После прохождения сигналом фильтра Бесселя воспользуемся визуализатором “созвездия” электрического сигнала (Electrical Constellation Visualizer) (рисунок 28). Он показывает фазовые и квадратурные электрические сигналы. Также может оценить вероятность ошибки символа.

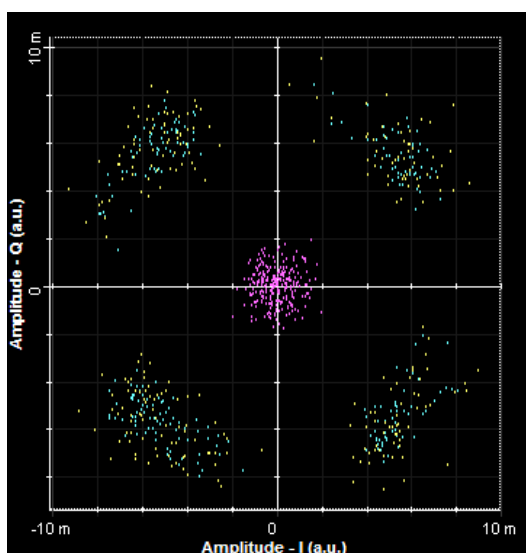


Рисунок 28 – диаграмма фазовых состояний на выходе фильтра Бесселя

Как говорилось ранее, в данной схеме используется передача 2 бита на символ. В дополнение к этому, модуляция происходит также с помощью поляризации оптического сигнала [2]. Поэтому на визуализаторе наблюдается сразу 4 фазовых состояния (рисунок 29). Стоит отметить, что при малейшем изменении параметров системы данная диаграмма “созвездия” будет значительно искажаться, что приведёт к неработоспособности системы.

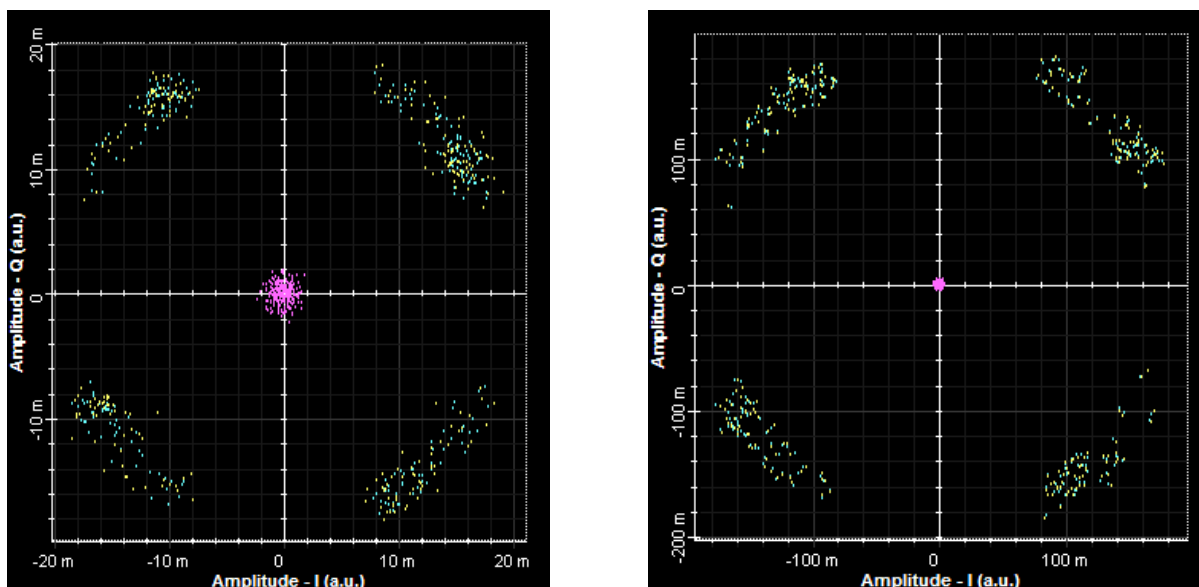


Рисунок 29 – диаграммы фазовых состояний при увеличении протяжённости волоконной линии до 140 км (слева) и при увеличении мощности усилителя в два раза (справа)

Полученные результаты показывают, что в данной схеме на скорости в 100 Мбит/с возможно точное детектирование и декодирование полученного сигнала.

После прохождения фильтра Бесселя сигнал попадает на многоуровневый пороговый детектор, который декодирует многоуровневый электрический сигнал в многоуровневый. Он позволит компенсировать задержку, возникшую при распространении сигнала.

Затем следует декодер (PSK Decoder). Он преобразует входные многоуровневые сигналы (M-ary) в обыкновенную цифровую бинарную последовательность. По принципу работы схож с кодером и имеет одинаковый математический аппарат. Данные с обоих PSK-декодеров поступают на сумматор, где две битовые последовательности складываются и образуют одну последовательность с удвоенной скоростью передачи.

После всех преобразований на выходе сумматора мы можем наблюдать глазковую диаграмму, близкую к идеальной, что указывает на эффективность работы данной системы на высоких скоростях (рисунок 30) [13].

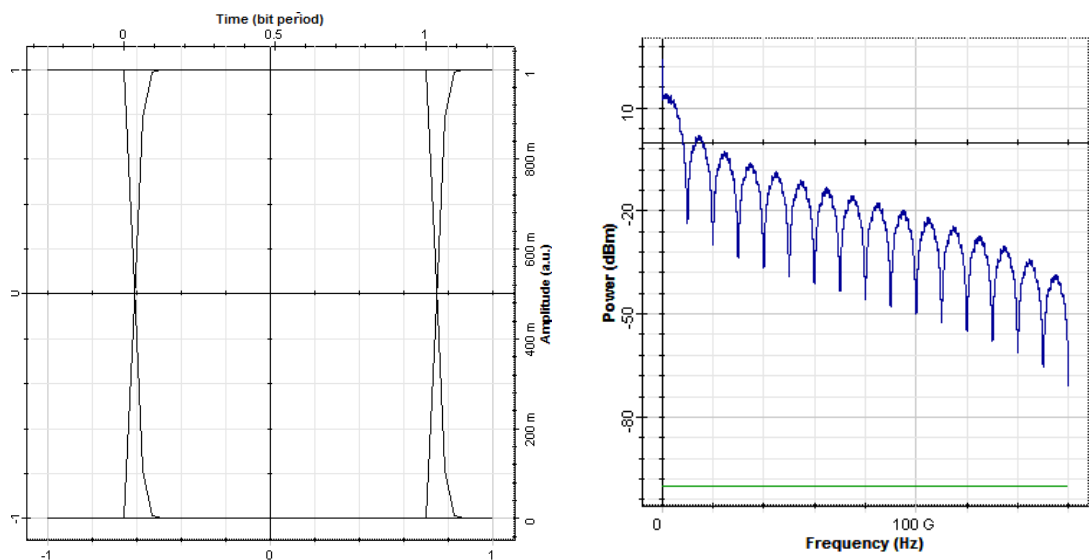


Рисунок 30 – глазковая диаграмма (слева) и спектр (справа) полученного сигнала

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты курсового проекта состоят в следующем:

На основе проведенного сравнительного анализа применяемых и перспективных форматов модуляции в оптических системах связи выявлено: Амплитудные форматы модуляции ограничены по скорости передачи символов и применяются обычно на скоростях до 10 Гбит/сек. Это связано с влиянием межсимвольной и межканальной интерференции, чирп эффектом источника излучения. При скоростях до 40 Гбит/сек используются амплитудные форматы, в которых с помощью VSB фильтров удаляется часть спектра. Данная особенность вызвана подавлением боковых нежелательных мод, однако, при длине линии связи более 50 км необходима повторная фильтрация. При скоростях свыше 40 Гбит/сек до 100 Гбит/сек применяются многоуровневые фазовые форматы модуляции QPKS, DP-QPSK, N-QAM, где на один переданный символ приходится 2 и более бита информации.

В среде проектирования OptiSystem проведено моделирование схемы высокоскоростной передачи данных 100 Гбит/с с DP-QPSK модуляцией. В результате моделирования были получены глаз-диаграмма, сигнальные созвездия, осциллограммы и спектры сигнала с двуполяризованной квадратурной фазовой манипуляцией.

Экспериментальные данные совпали со сведениями в литературных источниках. Формат DP-QPSK оказался намного эффективнее DPSK и простого QPSK. Спектральная эффективность DP-QPSK в два раза превосходит простой QPSK. При использовании кодирования 3 бита на символ можно добиться еще большей спектральной эффективности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т.1 – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. – 784 с.

2 Alla Abbas Khadir Achieving Optical Fiber Communication Experiments by OptiSystem // International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.6, June- 2014, pg. 42-53.

3 Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) Сравнительный анализ устройств для опроса волоконно-оптических датчиков. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 7 (16), 2015 – с 12.

4 Video Signal Transmission through DWDM Network. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. Vol.2, No.1, Pages: 276 – 279 (2013). Special Issue of ICACSE 2013 - Held on 7-8 January, 2013 in Lords Institute of Engineering and Technology, Hyderabad.

5 Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. М.: EXFO, 2001. / Пер. с англ. под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева, А.В. Шмалько. / Общая редакция А.В. Шмалько, - 245 с.

6 Р. Убайдуллаев, Телеком Транспорт. Протяженные ВОЛС на основе EDFA. LIGHTWAVE russian edition №1.

7 Официальный сайт компании Optiwave // (Engl.). – URL: <https://www.optiwave.com/PP/RC/rc9808.html> [10 May 2017].

8 Листвин В. Н. DWDM системы / В. Н. Листвин, В. Н. Трещиков. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 296 с

9 Muhammad Haris. ADVANCED MODULATION FORMATS FOR HIGH-BIT-RATE OPTICAL NETWORKS / School of Electrical and computer Engineering Georgia Institute of Technology August, (Engl.) 2008 - 250 с.

10 Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах, Теория и практика, 2016 - 516 с.

11 Склад Б. Цифровая связь. — М.: Издательский дом Вильямс. 2003 — 1104с

12 Фокин В.Г. Когерентные оптические сети, Новосибирск 2015, Издательский центр СибГУТИ. 2015 – 370 с.

13 100 Gbps DP-QPSK System with Digital Signal Processing // (Engl.) – URL: <https://optiwave.com/applications/100-gbps-dp-qpsk-system-with-digital-signal-processing/>