

На правах рукописи

Cyl

Суворков Илья Сергеевич

**Исследование параметров оптической системы связи с технологией Nyquist -
WDM**

Направление подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Программа магистратуры – Сети, системы и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

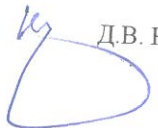
магистерской диссертации

на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2021

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:
кандидат технических наук

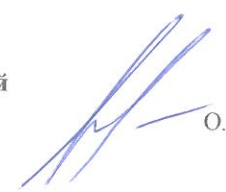
 Д.В. Кусайкин

Рецензент:

 Д.В. Денисов

Защита состоится «28» июня 2021 г. в 09:00 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. Шумилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Система с технологией Nyquist-WDM позволяет увеличить спектральную эффективность (а, следовательно, и пропускную способность оптической системы связи при определенной полосе передачи). Для этого в системе каналы необходимо располагать с максимальной плотностью, а спектр модуляции сигнала будет иметь прямоугольную форму. Это требуется для создания более экономичных и высокопроизводительных оптических систем связи.

К основным требованиям и исходным данным можно отнести следующие пункты: научные публикации по теме исследования, общие документы и рекомендации ИТУ-Т.

Актуальность задачи исследования – это возможность создания DWDM систем с большим числом каналов, большей пропускной способностью и скоростью, и минимальными недостатками системы. Для этого необходимо исследовать систему с технологией Nyquist-WDM.

Именно технология Nyquist-WDM позволяет увеличить пропускную способность и количество каналов.

В соответствии с назначением и условиями функционирования системы радиосвязи ее эффективность может оцениваться на основании различных показателей (критериев), где основными считаются энергетический и спектральный. Соответственно, самыми важными характеристиками любой системы радиосвязи являются энергетическая и спектральная эффективность, которые характеризуют, соответственно, энергетические затраты и полосу занимаемых частот, необходимую для передачи сообщений.

Вот только, одновременное достижение предельных значений данных показателей эффективности является невозможным, потому что в каждом конкретном случае построения системы передачи необходимо следовать компромиссным соображениям при проведении оптимизации характеристик режимов функционирования системы.

Наиболее проблемным является решение задачи снижения удельных затрат DF в отведенной полосе частот. Данная проблема более применима к системам передачи информации, которые используют многочастотные сигналы с OFDM. Эти сигналы (сигналы с OFDM) характеризуются высокой помехоустойчивостью приёма при условиях межсимвольной интерференции, которая вызвана многолучевым распространением. Также они обладают малой восприимчивостью к влиянию узкополосных помех и могут позволить значительно облегчить реализацию приемно-передающих трактов радиомодемов.

Однако такие сигналы обладают недостаточной спектральной эффективностью или высокими удельными затратами полосы частот. Величина таких затрат составляет, например, для двоичного алфавита 1 Гц/(бит/с). Помимо этого, высокий уровень внеполосных излучений, который

присущ сигналам с OFDM не предоставляет возможности уменьшить защитный интервал между каналами передачи информации.

В России проблемой повышения спектральной эффективности занимаются не все компании отрасли связи, но рассматриваемые в работе вопросы, а именно с применением технологии Nyquist-WDM исследует компания Т8.

Среди зарубежных работ многие рассматривают исследование параметров системы с технологией Nyquist-WDM. Но рассматривают с другими форматами модуляции или методами применения.

Несмотря на большое количество работ, все равно необходимо исследование для дальнейшего улучшения оптических систем.

Объект исследования – оптическая система связи с технологией Nyquist-WDM.

Предмет исследования – параметры оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM.

Целью работы является исследование параметров оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM.

Для достижения означенной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ публикаций по теме исследования;
- 2) провести анализ и классификацию методов повышения спектральной эффективности;
- 3) привести описание фильтров Найквиста, используемых в оптических системах передачи;
- 4) привести описание технологии Nyquist-WDM;
- 5) выбрать программное обеспечение для построения модели;
- 6) разработать модель, а именно выбрать среду моделирования и провести анализ разрабатываемой модели;
- 7) построить исследуемую модель и сделать выводы на основе исследования.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующим:

- исследованы параметры при изменении, которых меняется производительность системы;
- использован современное программное средство для построения и анализа оптических систем;
- изложены идеи, которые можно исследовать для дальнейшего развития оптических систем;
- проведено небольшое изменение модели для вычисления параметров системы.

Практическая значимость.

Практическая ценность состоит в исследовании оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM, которое позволит произвести выбор оптимальных параметров системы передачи и оценить эффективность технологии.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием программной среды OptiSystem, в которой можно строить большие схемы и изменять параметры для исследования. Также применялся анализ схем и графиков.

Положения, выносимые на защиту:

- методы повышения спектральной эффективности;
- выбор программной среды;
- исследование изменения параметров оптической системы с технологией Nyquist-WDM с модуляцией 16-QAM
- выводы на основе исследования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена следующими фактами:

- теория построена на известных и проверяемых данных с использованием методов теории моделирования, теории эксперимента и согласуется с экспериментальными данными по теме диссертации;
- для экспериментальных работ результаты получены в специальной программной среде для исследования оптических систем при различных параметрах;
- использованы сравнения данных полученных при разных параметрах;
- использованы современные средства сбора и обработки данных.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации были получены и использованы в рамках научно-исследовательских работ (НИР), в том числе:

В рамках круглого стола со всероссийским и международным участием «Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества» (Пенза, 2021) проходящий 15-16 июня 2021 года.

Также результаты рассматривались в рамках Международной научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, 2021) секция Многоканальная электросвязь и оптические системы, которая проходила 23-24 апреля 2021 года.

По теме диссертации опубликовано 2 научные работы, в том числе 2 статьи в научных журналах, рекомендованных РИНЦ.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 27 наименований. Объем диссертации 109 страниц, включены также 74 рисунка и 4 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена практическая ценность. Также описаны основные вопросы и проблемы связанные с темой диссертации.

В первой главе (Обзор научных публикаций по теме исследования) рассмотрены статьи (публикации) по теме исследования. Сначала представлены основные моменты и проблемы, связанные с оптическими системами, а именно высокая скорость передачи, пропускная способность и спектральная эффективность.

Далее рассмотрены основные моменты по каждой из публикаций.

Сначала рассматривается основная теория, затем приводятся результаты, приведенные в публикации, а далее выводы на основе публикаций.

Приведена экспериментальная установка системы с технологией Nyquist-WDM на рисунке 1.

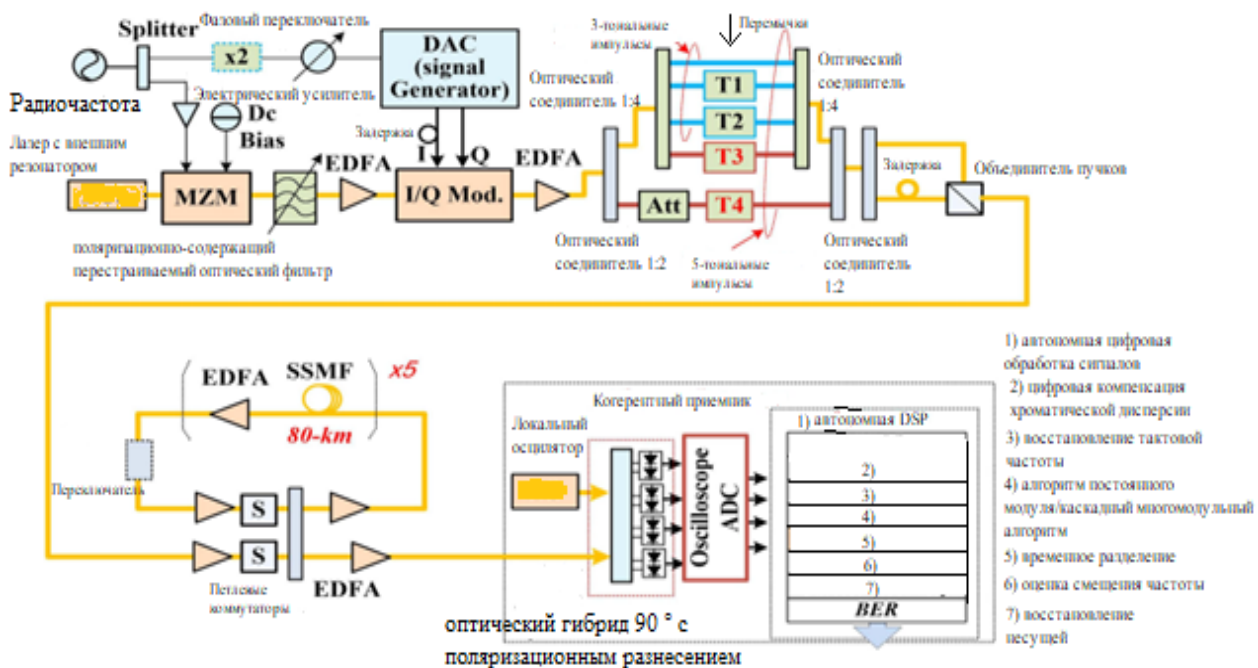


Рисунок 1 – Экспериментальная установка полностью оптической поляризации мультиплексированного сигнала Найквиста, волоконная передача и полнодиапазонное когерентное обнаружение сигнала

Приведено описание процесса, проходящего в установке, изображенной на рисунке 1.

Система с технологией Nyquist-WDM устойчива к практической реализации ограничения приемника.

Далее рассмотрены сигналы Найквиста.

Из-за почти квадратного спектра передача сигналов Найквиста позволяет плотно упаковывать несколько каналов WDM или несколько

подканалов (для увеличения SE WDM) без использования жесткой оптической фильтрации. Формирование импульсов Найквиста, цифровое предварительное выравнивание, а также предварительная компенсация дисперсии волокна – все это может быть реализовано в частотной области с помощью одного цифрового фильтра формирования спектра. Для сигнализации Найквиста требуется модифицированные алгоритмы, которые позволят улучшить чувствительность приемника и снизить проблему проскальзывания цикла (потеря информации или ее дублирование из-за нарушений в системе синхронизации).

В исследованных случаях показано, что для передачи на большие расстояния нелинейность волокна – это ключевая проблема, поскольку возникают искажения. Сигналы Найквиста могут обеспечить наивысшую спектральную эффективность (SE) для любого заданного формата модуляции, потому что спектр имеет очень острые фронты нарастания/спада.

Далее были рассмотрены системы с модуляцией за счет которой снижается эффект замирания мощности. Экспериментально продемонстрированная полоса пропускания WDM-CAP-PON показывает высокую пропускную способность и эффективность использования полосы пропускания для снижения эффекта замирания при невысокой стоимости сетей связи.

Еще был описан гибридный подход благодаря которому можно избежать ограничений, если использовать стандартные подходы. Предложенный гибридный подход может сбалансировать сложность передатчика между оптической и электрической областями, позволяя генерировать модулированные каналы Найквиста со скоростью передачи символов >100 ГБод без использования какого-либо полосового оптического фильтра для подавления боковых лепестков.

Рассматривались исследования с применением схем Крамерса-Кронига и фильтров линеаризации.

Проведенные исследования только со схемой Крамерса-Кронига и с фильтрами линеаризации и схемой Крамерса-Кронига показали, что у каждой схемы были свои достоинства и недостатки. Например, при исследовании без линеаризации система имела низкий показатель BER. Метод с одноступенчатым фильтром линеаризации вносит помехи, ограничивая производительность. Показатель BER уменьшен. При методе с двухступенчатым фильтром есть компенсационный выигрыш. Данный фильтр лучше одноступенчатого. При итеративном фильтре улучшается производительность одноступенчатого фильтра, однако при улучшении, усложняется схема и увеличивается количество итераций. А схема алгоритма Крамерса-Кронига имеет самую выдающуюся производительность.

Импульсные сигналы Найквиста были преобразованы с повышением частоты до частоты поднесущей и складываются друг с другом для получения сигнала QAM Nyquist-SCM с двойной боковой полосой. При последовательной работе не было необходимости применять отсечение для

Nyquist-SCM сигнала, так как его значение отношения пиковой мощности к средней мощности (PAPR) было равно 7,8 дБ, что было достаточно низким.

PAPR сложного сигнала определяется как уравнение (1), а значение PAPR в дБ уравнением (2) которые выглядят следующим образом:

$$PAPR = \frac{\max[s(t)s^*(t)]}{E[s(t)s^*(t)]}, \quad (1)$$

$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10}(PAPR), \quad (2)$$

где $s(t)$ – комплексный сигнал;

t – временной индекс;

$E[s(t)s^*(t)]$ – ожидаемое значение мощности сигнала.

Дальнейшее исследование требует использования более высоких форматов модуляции таких как 64-QAM, 256-QAM. Также требуется применять не только новые формы и виды мультиплексирования, поляризации, но и новые виды элементов схемы.

Во второй главе (Анализ методов повышения спектральной эффективности оптических систем связи) проанализированы методы повышения спектральной эффективности. Рассмотрены фильтры Найквиста, технология Nyquist-WDM и программные среды для построения моделей.

Спектральная эффективность обычно определяется как скорость передачи бит, поделенная на используемую полосу частот ((бит/с)/Гц). Таким образом, можно заметить, что, умножая символьный период T на коэффициент $\alpha < 1$, но сохраняя расстояние между поднесущими частотами F , возможно увеличить спектральную эффективность (благодаря возрастанию битовой скорости) с коэффициентом примерно $1/\alpha$ для большого числа несущих. Тогда задается спектральная эффективность новой системы как $1/\alpha$ и, следовательно, $\alpha = 5/6$ означает спектральную эффективность 120% или выигрыш 20%, однако интервал между символами T останется соответствующим ортогональной системе, а интервал между поднесущими F уменьшится в соответствии с величиной α .

Хорошо понятно, что при попытках реализовать такие системы разработчики тотчас сталкиваются с реальными проблемами. К первой группе проблем относятся проблемы эффективной генерации и демупльтиплексирования сигналов для описанных систем, поскольку буквальное применение технологии FFT-IFFT имеет большие трудности. Ко второй группе относятся проблемы детектирования сигналов при условиях стремительно возрастающей интерференции между поднесущими.

Из рисунка 2 (а) можно заметить, что при малом числе поднесущих M сферический и полосовой детекторы при повышенной спектральной эффективности ($\alpha = 5/6$) позволяют обеспечить вероятность ошибки,

которая близка по значению к BER системы OFDM. При увеличении числа поднесущих вероятность ошибки повышается.

Для системы со спектральной эффективностью 5/4 (рисунок 2, б) ML и сферический детектор продолжают гарантировать вероятность ошибки, которая близка по значению к вероятности ошибки системы OFDM, при этом для полосового детектора вероятность ошибки значительно увеличивается.

Из описанных результатов можно сделать вывод, что применяемые принципы дают возможность строить системы с повышенной спектральной эффективностью, но возможности их реализации обуславливаются используемыми схемами детектирования.

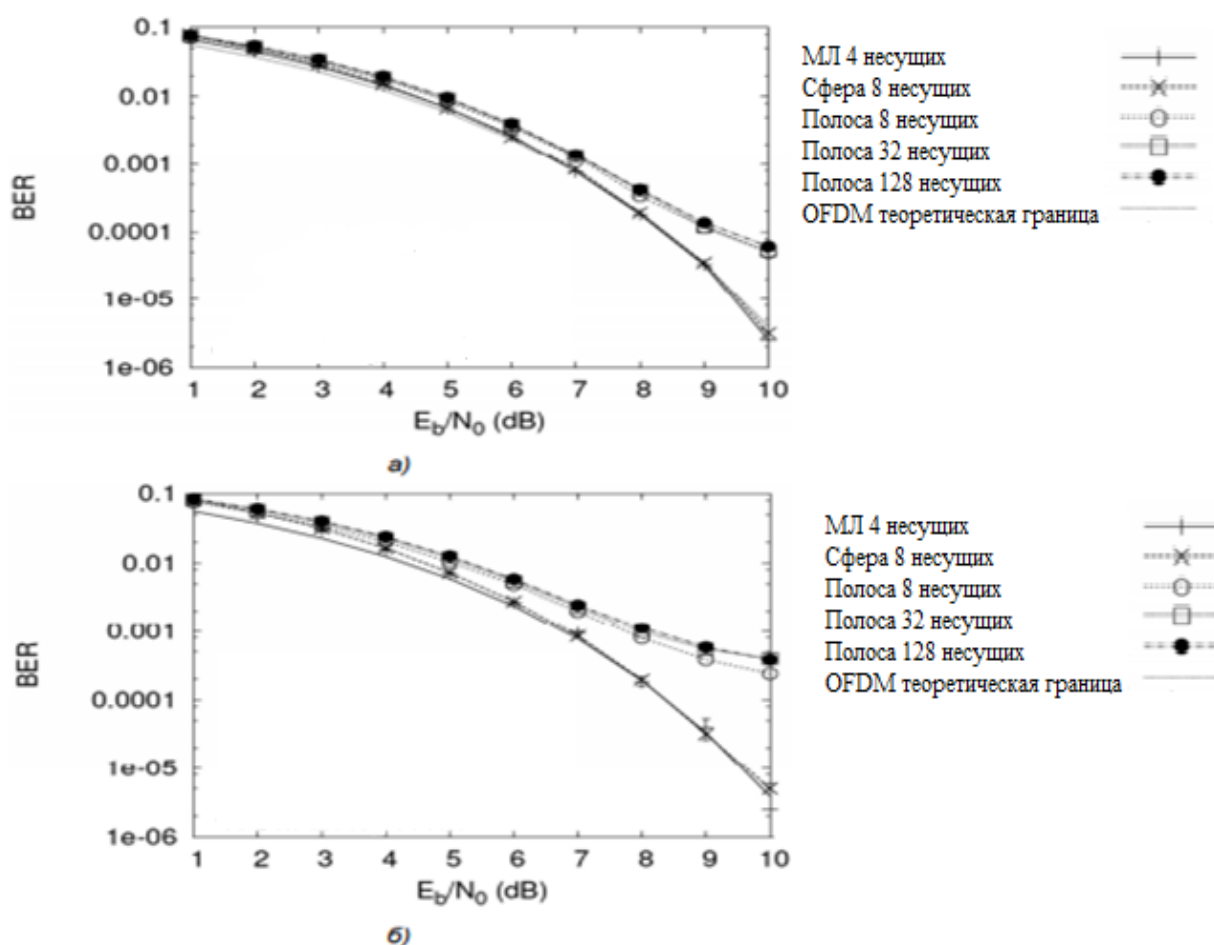


Рисунок 2 – Зависимости вероятности ошибки BER от отношения сигнал/шум для систем с 4-QAM, $\alpha = 5/6$ (а) и $\alpha = 4/5$ (б)

В настоящее время нужно иметь в виду, что некоторые параметры, благодаря которым были достигнуты заметные улучшения спектральной эффективности, уже достигли своего физического предела. Применение методов модуляции выше 64-QAM пока не нашло практического применения в стандартах сотовой связи, так как необходимо иметь хорошее отношение сигнал/шум и большую чувствительность приемника.

Фильтр Найквиста – это фильтр, который имеет передаточную функцию в виде прямоугольной функции, которая свернута с любой четной-

симметричной частотной функцией. Импульс Найквиста – это импульс, у которого форма может описываться функцией $\text{sinc}(t/T)$, умноженной на другую временную функцию. Поэтому, может существовать бесконечное множество фильтров Найквиста и соответствующих им импульсов. В категории фильтров Найквиста самыми популярными считаются фильтры, которые имеют характеристику типа приподнятого косинуса или корня из приподнятого косинуса.

Были представлены сигналы, Найквиста с выхода согласованного фильтра и пропущенные через фильтры типа приподнятого косинуса и типа корня из приподнятого косинуса. Сигналы представлены на рисунке 3 и рисунке 4.

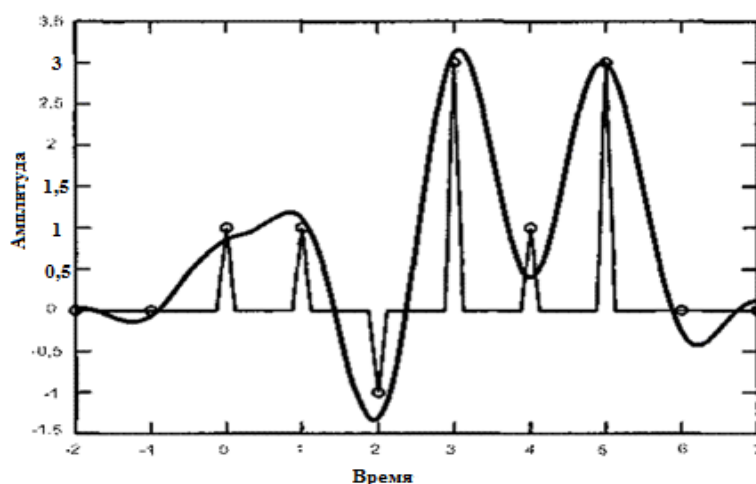


Рисунок 3 – М-уровневый сигнал Найквиста, пропущенный через фильтр с характеристикой типа корня из приподнятого косинуса

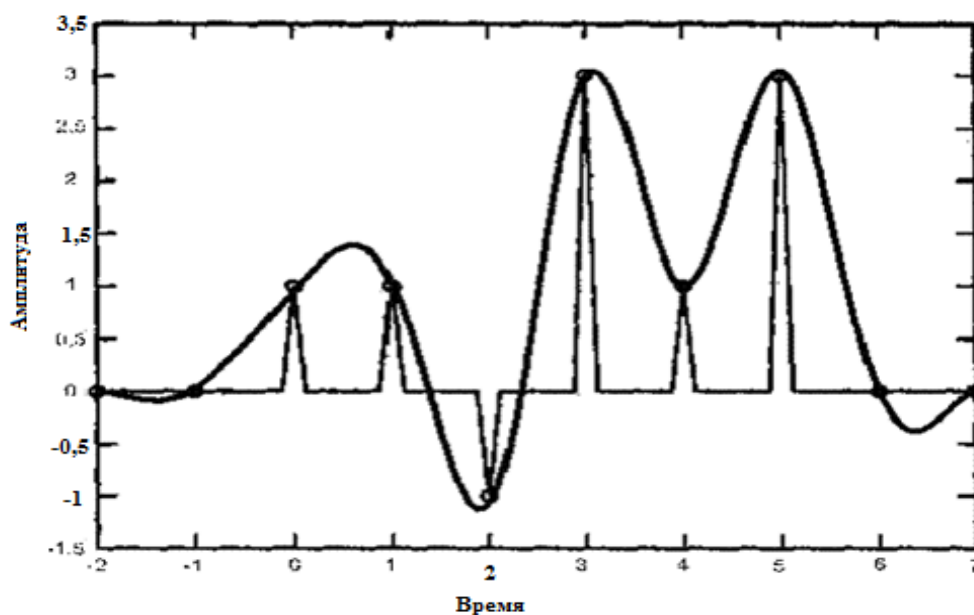


Рисунок 4 – Выход фильтра с характеристикой типа приподнятого косинуса и входные дискретные значения, задержанные на некоторое время

Технология Nyquist-WDM – это технология, которая позволяет формировать оптические сигналы с близким к прямоугольному спектру излучения для сверхплотного расположения DWDM каналов.

Основной проблемой при построении сверхплотных систем DWDM считается то, что при уменьшении шага частот возникает перекрытие спектров соседних каналов и происходит размытие светового пучка. Что приводит к увеличению числа ошибок и невозможности передачи информации по системе.

Нелинейные эффекты волокна, особенно SPM в системах Nyquist-WDM, вызывают нелинейные фазовые искажения и тем самым приводят к серьезному ухудшению характеристик. Следовательно, одновременное смягчение жесткой предварительной фильтрации и ухудшение нелинейности оптоволокна является наивысшим приоритетом для передачи на большие расстояния Nyquist-WDM. Благодаря тому, что полная информация об оптическом поле сохраняется и доступна, цифровое когерентное обнаружение предлагает рентабельный способ смягчить такие ухудшения в электрической области с помощью усовершенствованного DSP.

Системы Найквиста-WDM могут помочь уменьшить разнос каналов для достижения высокого значения SE, но они по своей природе чувствительны к дрейфу несущей частоты.

Среди программных сред для проектирования системы рассматривались: программа OptiSystem, Matlabи Photonics and Optical Communication System Simulations Modules.

Из преимуществ и возможностей наиболее подходящей оказалась OptiSystem, так как имеет большое количество возможностей и компонентов для построения оптических систем.

В третьей главе (Разработка модели оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM) изложены результаты по исследования оптической параметров оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM с модуляцией 16-QAM.

Для начала был произведен выбор среды моделирования и была выбрана среда OptiSystem из-за своих возможностей и достоинств.

Благодаря разнообразию компонентов, представленных в данных решениях можно собрать и смоделировать различные схемы, а также измерять параметры. Например, передаточные функции, свободные каналы в пространстве, эффекты рассеяния и прочее.

OptiSystem предоставляет наиболее полный набор решений для оптической связи и фотоники для инженеров оптического проектирования. Его основные решения включают в себя:

- библиотека передатчиков;
- библиотека приемников;
- оптические волокна;
- усилители;
- инструменты сетевого дизайна;

- фильтры;
- пассивные элементы;
- инструменты для обработки сигналов;
- инструменты для проектирования оптики;
- инструменты визуализации.

Далее был приведен анализ разрабатываемой модели. Для начала был рассмотрен принцип преобразования сигналов Nyquist-OTDM систем в сигналы Nyquist-WDM систем с использованием фазового модулятора и фильтра Найквиста.

Данный принцип продемонстрирован на рисунке 5.

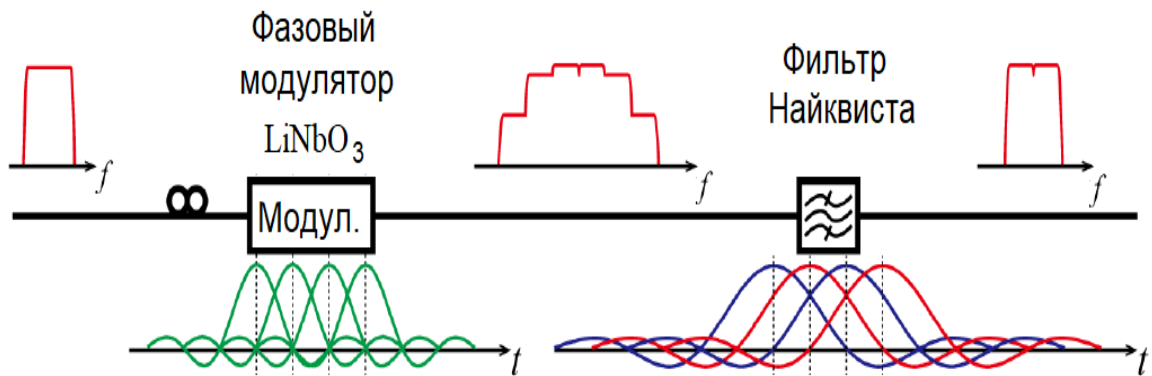


Рисунок 5 – Преобразование сигнала для системы Nyquist-WDM

Импульсы Найквиста системы OTDM модулируются по фазе синусоидальной волной с частотой равной половине скорости передачи сигнала. Фазовый модулятор представляет собой модулятор LiNbO_3 . Фазовая модуляция синусоидальным сигналом соответствует частотной модуляции сигналом $\cos(\omega t + \varphi_0)$. Нарастание и уменьшение значения фазы – это сдвиг несущей частоты в более низкий и высокий диапазон соответственно. Следовательно, каждый символ сигнала имеет разную несущую частоту по сравнению с соседними символами, как показано на рисунке 5. Сигнал $x(t)$ в виде импульса Найквиста OTDM-систем может быть выражен уравнением (3):

$$x(t) = \sum_n A_n h_0(t - nT)$$

$$h_0(t) = \frac{\sin(2\pi f_0 t)}{2\pi f_0 t}, \quad f_0 = \frac{1}{2T}, \quad (3)$$

где A_n – комплексная амплитуда n -го информационного импульса;

$h_0(t)$ – импульс Найквиста;

T – интервал следования информационных импульсов.

Sinc-импульс $h_0(t)$ может быть преобразован в уравнение (4) имеющее следующий вид:

$$h_0(t) = \frac{\sin(2\pi f_0 t)}{2\pi f_0 t} = \frac{\sin(2\pi \frac{f_0}{2} t)}{2\pi \frac{f_0}{2} t} \cos(2\pi \frac{f_0}{2} t) = h(t) \times \frac{1}{2} (e^{-2\pi f_m t} + e^{+2\pi f_m t})$$

$$h(t) = \frac{\sin(2\pi f_m t)}{2\pi f_m t} = h_0\left(\frac{t}{2}\right), \quad f_m = \frac{f_0}{2}.$$
(4)

Подставляя уравнение (4) в (3), можно получить уравнение (5) которое выглядит:

$$x(t) = \frac{1}{2} \sum_n A_n h(t - nT) \times (e^{-j2\pi f_m(t-nT)} + e^{+j2\pi f_m(t-nT)})$$

$$= \frac{1}{2} \sum_n A_n e^{+j\frac{\pi}{2}n} h(t - nT) e^{-j2\pi f_m t} + \frac{1}{2} \sum_n A_n e^{-j\frac{\pi}{2}n} h(t - nT) e^{+j2\pi f_m t}.$$
(5)

Первый и второй члены соответствуют более низкой ($-f_m$) и более высокой ($+f_m$) частотной составляющей соответственно, как показано на рисунке 6. Если применить фазовую модуляцию, то результирующий спектр будет сверткой сигнала с набором порождаемых фазовой модуляцией частотных составляющих. Поскольку фильтр Найквиста имеет ту же полосу пропускания, что и исходный сигнал, можно акцентировать внимание только на боковые полосы первого порядка.

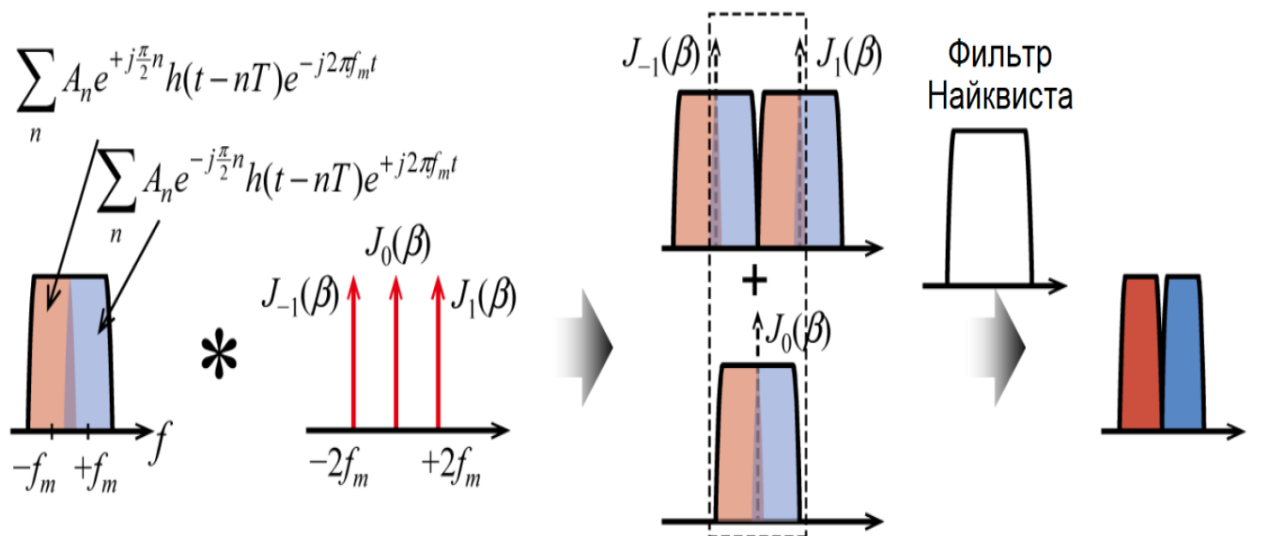


Рисунок 6 – Преобразование оптических импульсов Найквиста OTDM-систем в импульсы Найквиста для системы WDM

Если игнорировать внеполосные компоненты ($\pm 3f_m$) и использовать соотношение $J_{-1}(\beta) = -J_1(\beta)$, то выходной сигнал $y(t) = x_0(t) + x_1(t) + x_{-1}(t)$ можно выразить уравнением (6):

$$y(t) = \frac{1}{2} \sum_n A_n (J_0(\beta) e^{+j\frac{\pi}{2}n} - J_1(\beta) e^{-j\frac{\pi}{2}n}) h(t - nT) e^{-j2\pi f_m t} + \frac{1}{2} \sum_n A_n (J_0(\beta) e^{-j\frac{\pi}{2}n} + J_1(\beta) e^{+j\frac{\pi}{2}n}) h(t - nT) e^{+j2\pi f_m t}. \quad (6)$$

Далее будем проводить эксперимент. Схема для исследования представлена на рисунке 7. А на рисунке 8, рисунке 9 и рисунке 10 представлены отдельные блоки схемы. На рисунке 8 представлен блок передатчика 16-QAM таких блоков на рисунке 7 пять. На рисунке 9 представлен блок когерентного приемника, а на рисунке 10 представлен блок цифрового процессора.

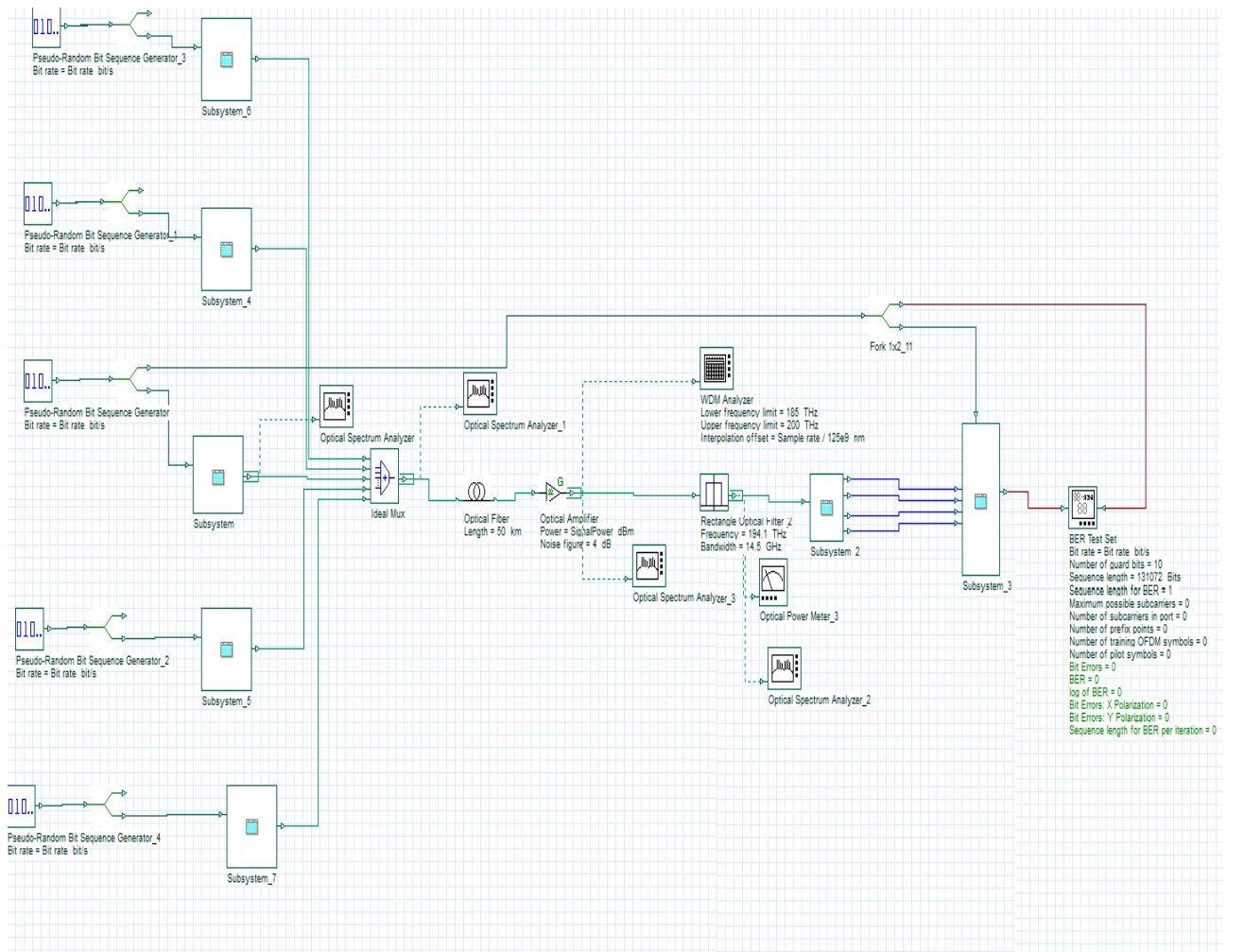


Рисунок 7 – Схема оптической системы с технологией Nyquist-WDM с модуляцией 16-QAM

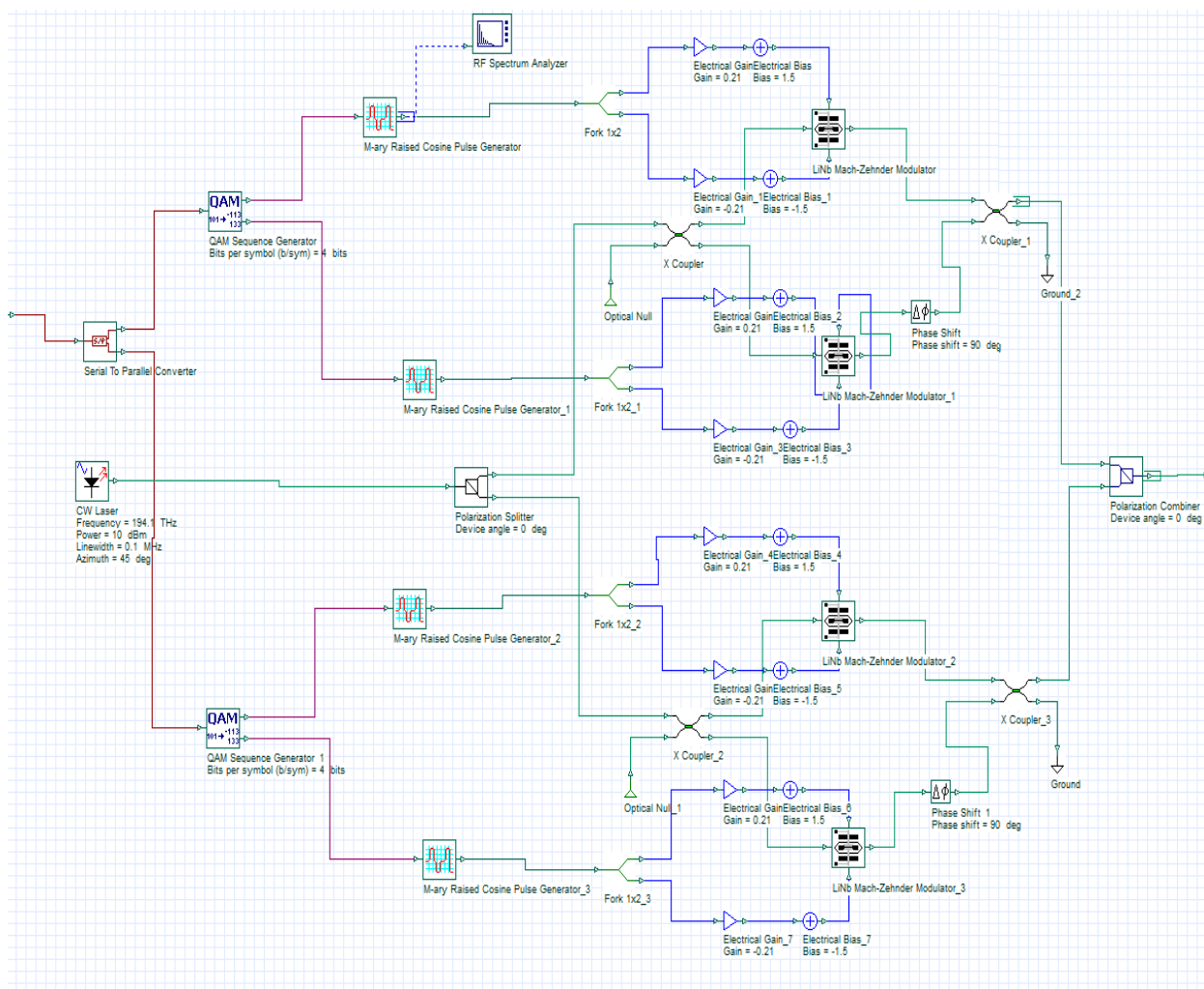


Рисунок 8 – Схема блока формирования сигнала формата DP-QAM

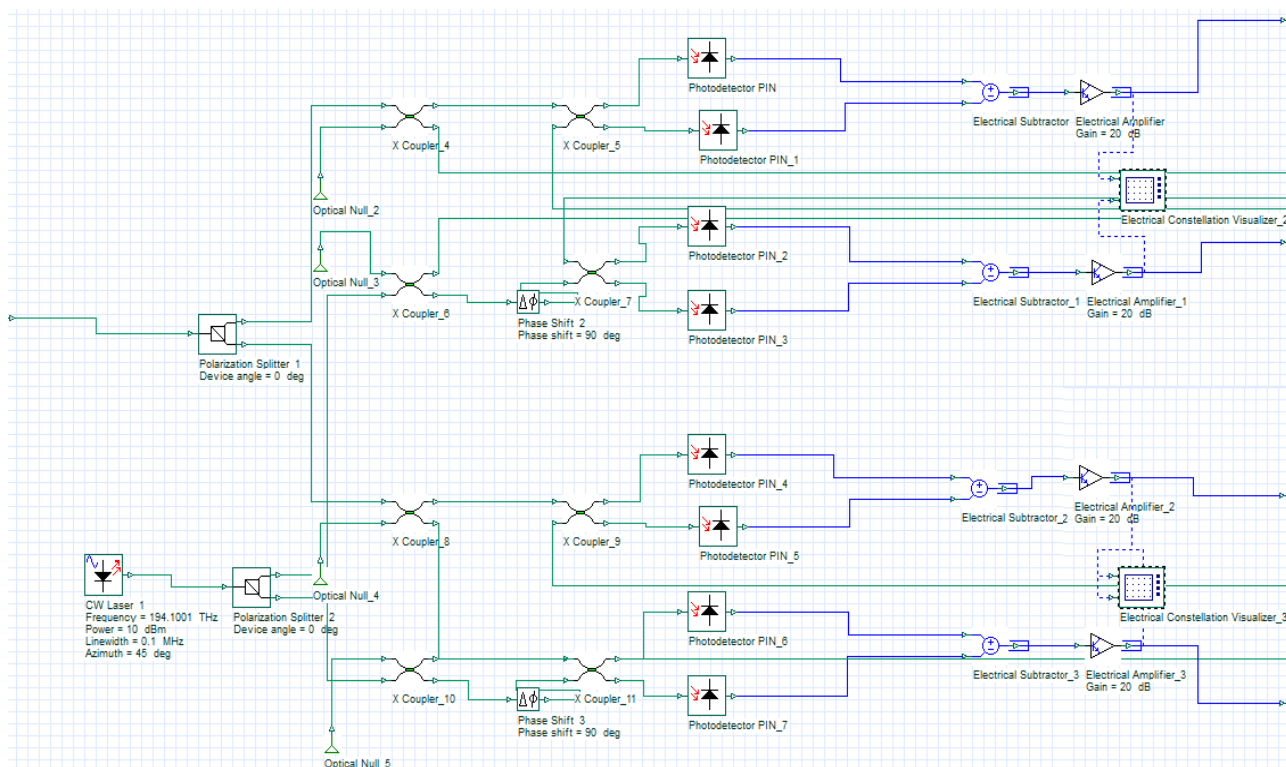


Рисунок 9 – Схема когерентного приемника

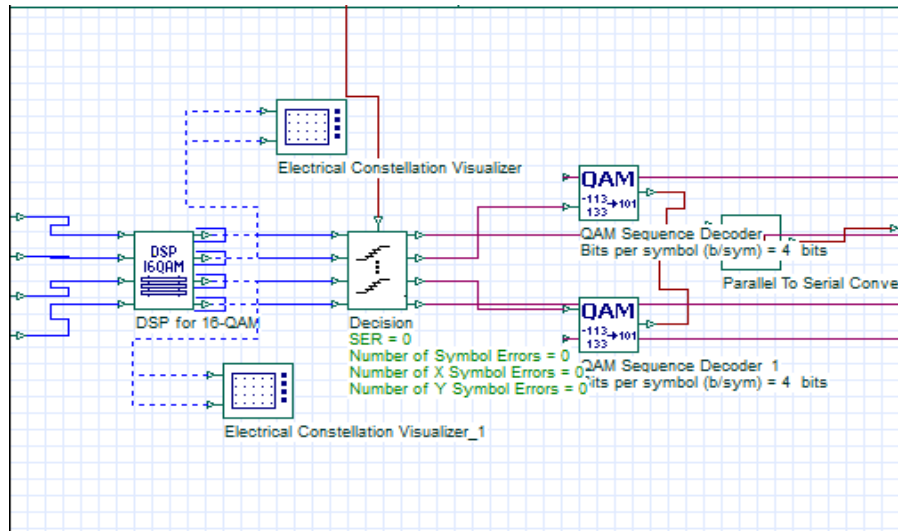


Рисунок 10 – Схема цифрового процессора для модуляции 16-QAM

Было проведено исследование с изменением параметров: разнеса между каналами и пропускной способности. При каждом исследовании созвездие для модуляции 16-QAM менялось, но все равно оставалось созвездием для модуляции 16-QAM. Спектр при изменении разнеса между каналами менялся и это было заметно по рисункам (менялось расстояние между несущими). Примеры созвездия и спектра представлены на рисунке 11 и рисунке 12.

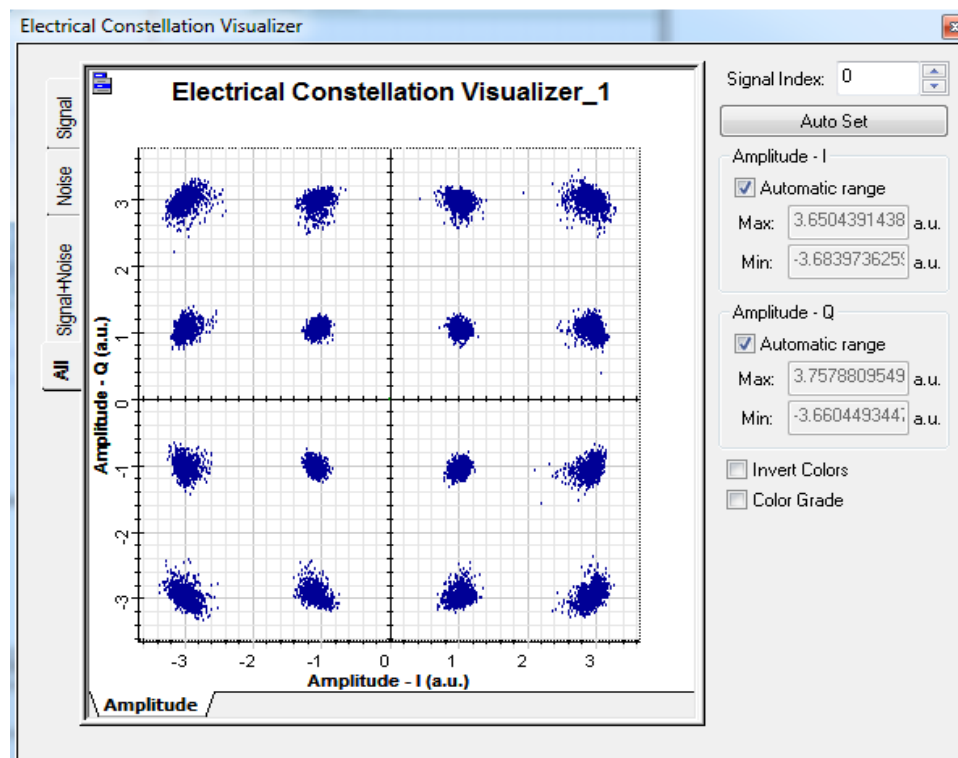


Рисунок 11 – Вид созвездия на цифровом процессоре

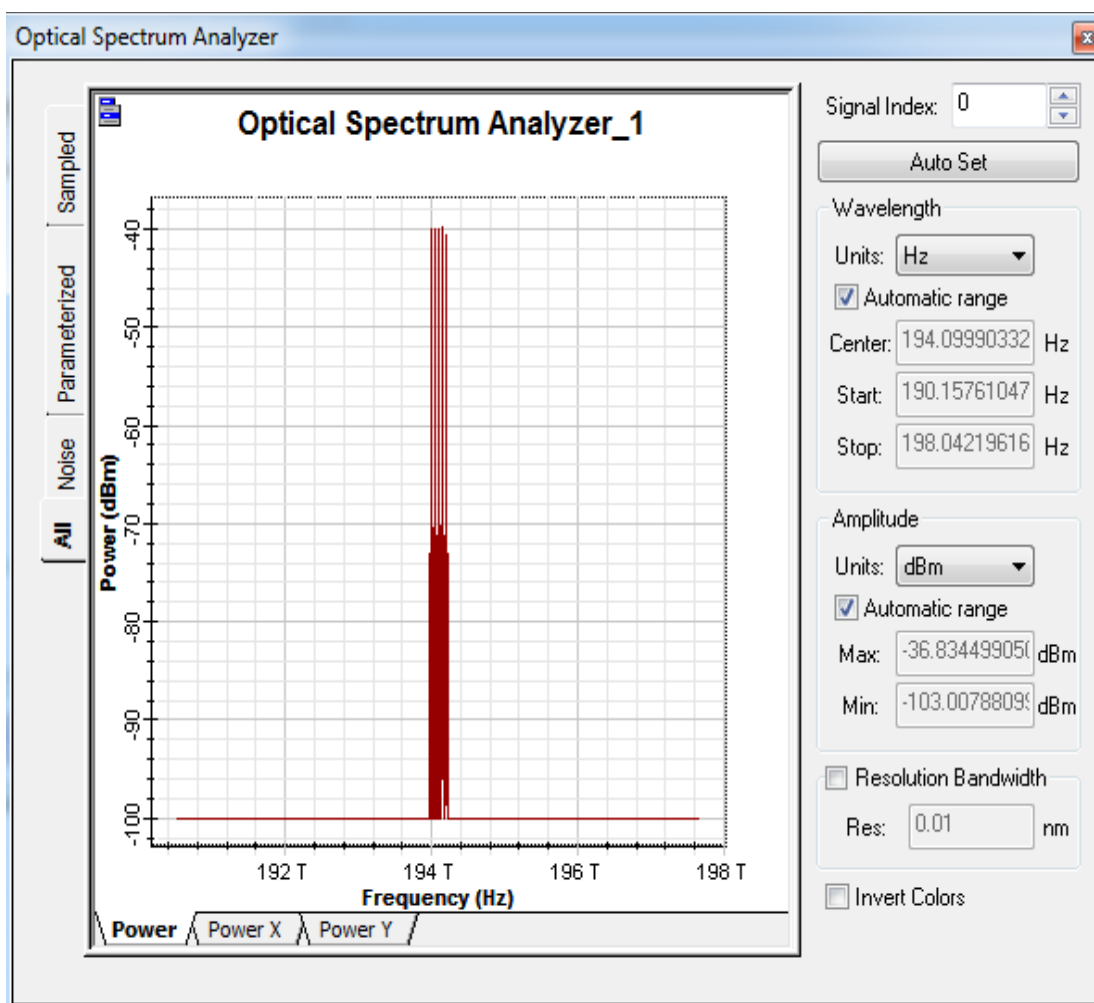


Рисунок 12 – Спектр сигнала после мультиплексирования

В исследовании также было замечено, что при увеличении разноса между каналами и увеличении пропускной способности может меняться коэффициент ошибок, например, при разноре 15 ГГц он был 30×10^{-6} , а при разноре 50 ГГц он равен 15×10^{-6} . При пропускной способности также только если увеличивать с 14,5 до 30 ГГц при одинаковом разноре между каналами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была достигнута цель по исследованию параметров оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM. Были исследованы параметры, которые могут повысить эффективность оптических систем передачи. В ходе выполнения работы был поставлен и решен ряд задач.

Первой задачей является анализ публикаций по теме исследования. На основе обзора публикаций проведен анализ состояния области исследования.

В ходе обзора публикаций рассматривались основные моменты и параметры, которые влияют на производительность, эффективность и скорость оптических систем передачи. Были описаны такие параметры, как спектральная эффективность, дальность передачи, скорость передачи. На

основе анализа можно сделать выводы, что в дальнейшем для улучшения систем передачи нужно использовать различные виды мультиплексирования, поляризации и модуляции более высокого порядка.

Следующей задачей был анализ и классификация методов повышения спектральной эффективности. Спектральная эффективность в различных системах зависит от схем детектирования, числа поднесущих (небольшое число поднесущих при высокой спектральной эффективности понижает коэффициент ошибок). На основе анализа и классификации был сделан вывод, что некоторые параметры, которые используются для улучшения спектральной эффективности достигли предела, а применение видов модуляции более высокого порядка, пока не нашли практического применения. Но для повышения спектральной эффективности перспективным являются использование форматов модуляции более высокого порядка или схем более мощного помехоустойчивого кодирования.

Третьей задачей было описание фильтров Найквиста. В ходе рассмотрения были представлены параметры и спектры фильтров Найквиста. Проведен анализ импульсов фильтра Найквиста. В ходе выполнения данной задачи можно сделать вывод, что спектр импульсов (корень из приподнятого косинуса) затухает медленнее, чем спектр (приподнятый косинус). Также импульс Найквиста у первого спектра не гарантирует нулевую межсимвольную интерференцию.

Также можно точно заметить, что фильтр Найквиста может дать нулевую межсимвольную интерференцию в момент взятия выборок, а другие фильтры не могут сделать этого.

Следующей задачей было описание технологии Nyquist-WDM. Приведены достоинства и недостатки системы с технологией Nyquist-WDM. Кроме того, были описаны явления и параметры, которые влияют на систему с технологией Nyquist-WDM. В результате выполнения был сделан следующий вывод:

Системы Nyquist-WDM могут уменьшить разнос между каналами для увеличения высокой спектральной эффективности, но они чувствительны к дрейфу несущей частоты. Однако главными факторами, которые ограничивают производительность системы Nyquist-WDM являются жесткая фильтрация и ухудшение нелинейности волокна.

Далее предстояла задача по выбору программного средства для построения модели. Из трех программных средств, описанных в работе, было выбрано наиболее качественное и с большей функциональностью, а таковой является программа OptiSystem.

Программа OptiSystem имеет большое количество компонентов для моделирования планирования и тестирования оптических систем, может работать совместно с Matlab. Программа имеет один недостаток – это то, что вся программа на английском языке. А студенту, который имеет недостаточные знания в английском языке будет сложно работать в данной программе.

Следующей задачей была разработка модели, а именно выбор среды и анализ модели.

Было описаны основные достоинства и функциональность используемой программы. В ходе работы над данной задачей был проведен анализ разрабатываемой модели. В анализе описывалась модель оптической системы передачи с технологией Nyquist-WDM и модуляцией 16-QAM. Анализ описывает элементы и блоки, используемые для построения модели, а также график спектра, полученный с блока с фильтрами.

Следующей задачей было построение модели и вывод на основе проведенного эксперимента.

Исходя из исследования система с технологией Nyquist-WDM с модуляцией 16-QAM отлично подходит для городских сетей, так как могут передавать большое количество бит с большой скоростью на небольшие расстояния. При этом коэффициент ошибок и битовые ошибки имеют минимальные значения.

Практическая ценность магистерской диссертации состоит в исследовании оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM, которое позволит произвести выбор оптимальных параметров системы передачи и оценить эффективность технологии.

Основные теоретические и практические результаты работы.

- 1) Рассмотрены и выявлены проблемы в оптических системах связи с технологией Nyquist-WDM.
- 2) Проведен анализ методов повышения спектральной эффективности.
- 3) Исследованы параметры оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM с модуляцией 16-QAM.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Суворков. И.С. Обзор исследуемых параметров оптических систем связи, использующих технологию Nyquist-WDM / Суворков И.С., Д.В. Кусайкин // Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества – Пенза, 2021.

2 Суворков И.С., Кусайкин Д.В. Моделирование оптической системы связи с технологией Nyquist-WDM / Суворков И.С., Кусайкин Д.В. // Международная Научно-техническая конференция: Современные проблемы телекоммуникаций – Новосибирск, 2021.