

Тобышева Светлана Викторовна

**Исследование влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок  
в канале связи технологии WDM-FSO**

Направление подготовки 11.04.02  
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
профиль: Многоканальные телекоммуникационные системы  
программа академической магистратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации  
на соискание квалификации (степени) магистра

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики» (г. Екатеринбург).

Научный руководитель  
к.э.н



Е.В. Букрина

Рецензент  
к.ф.-м.н.



В.Т. Куанышев

Защита состоится «1» декабря 2020 г. 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. Шумилова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

С каждым годом в мире всё больше увеличивается потребность в широкополосных каналах связи в условиях плотной городской застройки для предоставления абонентам доступа к мультисервисным сетям связи, а также для организации каналов связи в труднодоступных местностях.

Одним из перспективных решений вышеуказанной проблемы является использование технологии беспроводной связи – атмосферных оптических линий связи (АОЛС) или FSO – FreeSpaceOptics. Перспективность использования АОЛС объясняется такими факторами как лёгкость монтажа, обслуживания и эксплуатации, высокие скорости передачи (до нескольких Гбит/с), относительно низкая себестоимость организации каналов связи по сравнению с традиционными каналами связи, подразумевающими прокладку кабельной канализации в условиях плотной городской застройки, а также в свете требований городских администраций о демонтаже воздушных линий связи с опор наружного освещения.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена двумя факторами.

Необходимостью реализации направления «Информационная инфраструктура» в рамках программы «Цифровая экономика РФ», принятой для удовлетворения потребностей экономики по сбору, хранению, обработке и передаче данных отечественными сетями связи и инфраструктурой. Одним из столпов данного проекта является обеспечение широкополосного доступа к сети «Интернет». Основной задачей является обеспечение населения и социально значимых организаций качественным доступом в «Интернет» с возможностью подключения на всей территории Российской Федерации. Кроме того, инфраструктурными преимуществами Российской Федерации станут цифровые платформы работы с данными, а распределенная на территории страны система центров обработки данных будет обеспечивать как внутренний спрос на услуги по обработке и хранению данных, так и способствовать росту экспорта российских ИТ-услуг.

Для обеспечения качественного и бесперебойного доступа к сетям связи, а также для обеспечения сетями связи объектов в труднодоступных местностях и на перегруженных инфраструктурой участках необходимостью изучения процессов влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок в канале связи технологии WDM-FSO, так как это область является малоизученной, что замедляет процесс активного внедрения технологии передачи сигналов по атмосферным оптическим линиям связи.

Исследованиями атмосферных оптических линий связи занимаются российские и зарубежные научно-исследовательские организации не одно десятилетие, но до сегодняшнего дня технология организации каналов связи по атмосферным оптическим линиям связи не нашла широкого применения из-за недостаточной степени изученности относительно новой технологии и как

следствие – отсутствия каких-либо нормативно-технических документов на изготовление и применение необходимого оборудования. Наряду с вескими достоинствами вышеуказанной технологии остаётся ряд немаловажных вопросов, связанных с дополнительными исследованиями надёжности, приемлемых условий эксплуатации, влияния различных факторов на функционирование системы и конечно вопросов, связанных с экономической эффективностью при реализации каналов связи по атмосферным оптическим линиям.

Рассматриваемые в работе проблемы связаны с исследованиями, которые проводятся в рамках нескольких научных направлений. Различные методы моделирования сложных явлений и процессов отражены в научных статьях Ю.В. Писецкого, Н.М. Павлова, Н.М. Медведева, А.Ю. Николаева и других.

Теоретические основы решения задач организации каналов связи освещены в работах отечественных и зарубежных ученых И.Е. Никульского, В.Н. Гридина, Г.Г. Ишанина и других. В частности, эффективность применения многоканальной системы в атмосферно-оптических линиях связи определена в трудах С.В. Молчанова и А.В. Дашинского. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь исследовано в работах Д.Б. Медведа, Ю.И. Зеленюка.

Несмотря на большое количество научных работ, затрагивающих различные аспекты задачи организации каналов связи по атмосферным оптическим линиям связи, в этой области остаётся достаточно много вопросов, связанных с исследованиями влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок канала связи WDM-FSO. Это обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований и разработок, направленных на развитие технологии беспроводной системы передачи сигналов со спектральным уплотнением через атмосферное пространство.

**Объектом исследования** является оптическая линия связи WDM-FSO.

**Предметом исследования** является процесс влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок в оптической линии связи со спектральным уплотнением каналов.

**Целью данной научно-исследовательской работы** является исследование влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок в канале связи технологии WDM-FSO.

**Задачи научно-исследовательской работы:**

1) проанализировать особенности функционирования атмосферной оптической линии связи при ослаблении в аэрозолях – дождь, туман, снег в различных степенях проявлений;

2) Изучить процессы моделирования в среде MATLAB+SIMULINK, в среде LabVIEW и в среде OptiSystem;

3) спроектировать канал связи, в котором объединены технологии WDM и FSO;

4) разработать схему сети WDM-FSO в программе-эмуляторе OptiSystem;

5) определить оптимальные протяжённости линий связи с заданным числом оптических каналов, при заданной скорости передачи данных;

б) произвести оценку коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы.

**Научная новизна ожидаемых результатов** заключается в получении графиков зависимости коэффициента ошибок канала связи системы WDM-FSO от состояния атмосферы.

**Практическая ценность ожидаемых результатов** заключается в разработке схемы сети WDM-FSO в программе OptiSystem, которая позволит скомпилировать файл для проведения лабораторно-практических работ; полученные результаты позволят реализовать сеть связи WDM-FSO с применением существующих компонентов ВОСП.

**Положения, выносимые на защиту:**

- технология АОЛС (FSO), преимущества, области применения;
- структура сети на базе АОЛС;
- причины ослабления сигнала в атмосферной линии связи;
- визуализация результатов моделирования коэффициента ошибок в канале связи системы WDM-FSO.

**Апробация результатов исследования:** результаты исследования влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок в канале связи были опробованы в программе-эмуляторе OptiSystem и доказали свою состоятельность, сделан вывод о возможности использования результатов исследования для проектирования систем WDM-FSO.

Степень достоверности результатов исследования достаточно высока, поскольку в проведении исследований используется лицензированное профессиональное программное обеспечение OptiSystem, позволяющее моделировать канал связи и процессы, влияющие на качество передаваемых сигналов.

Диссертационная работа включает: введение, 3 главы, заключение, список литературы из 44 наименований. Объем диссертации: 105 листов, 68 рисунков, 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе **Анализ литературы на тему исследования** приведен обзор специализированной литературы, направленной на изучение исследуемой темы. Описаны ключевые понятия магистерской диссертации. Представлена предметная область рассматриваемой в работе темы магистерской диссертации. Выполнен анализ теоретических исследований влияния состояния атмосферы на атмосферные каналы связи. Произведен анализ технических решений для технологии WDM-FSO. Сделаны выводы по изученным материалам.

В научных статьях и публикациях проводилась оценки уместности специфичных FSO систем в конкретных приложениях, исследовались реальные ограничения FSO с учетом существующей технологии и с целью установления разумных ожиданий с учетом атмосферных условий. Был сделан вывод о том, что хорошо спроектированные FSO системы обеспечивают 99 % и лучшую доступность канала связи на расстояниях 500-1000 м для подавляющего большинства городов мира. Они безопасны для зрения и могут использоваться в течении расчетного срока эксплуатации при условии необходимого обслуживания.

В статье ведущего научного сотрудника Н.М. Павлова проведён анализ причин, препятствующих внедрению атмосферных оптических линий передач (АОЛП), было выдвинуто предположение, что главная причина заключается в неготовности производителей к выпуску аппаратуры АОЛП для местной широкополосной сети, обеспечивающей требуемый коэффициент готовности. Было отмечено, что решение указанных проблем даст возможность уже в ближайшие годы в условиях плотной городской застройки обеспечить большинство потенциальных потребителей широкополосной связью на местной широкополосной сети.

Для успешного применения АОЛС и передачи информации лазерным лучом необходимо учитывать зависимость пропускания оптического излучения от состояния воздушной среды, поэтому в статье Медведева Н.М. были проведены комплексные исследования распространения лазерного излучения в атмосфере.

В результате анализа литературных данных можно сделать вывод о том, что область исследования влияния состояния атмосферы на атмосферные каналы связи достаточно всесторонне изучена и апробирована, но вопрос в области оценки зависимости влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок канала связи с применением технологии спектрального уплотнения каналов, передаваемых через атмосферные оптические линии связи (WDM-FSO) остаётся «белым пятном». В связи с этим в данной научно-исследовательской работе методом моделирования производится исследование и подтверждение закономерности влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок канала связи с использованием технологии спектрального уплотнения каналов.

Данная тема требует дальнейших исследований. Результаты научно-исследовательской работы возможно применить для проектирования систем WDM-FSO, а теоретический материал диссертации можно применить как

лекционный материал и для разработки учебно-методических указаний к лабораторно-практической работе.

Во второй главе **Выбор среды программирования для проведения моделирования оценки коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы** рассмотрены и проанализированы процессы моделирования в среде MATLAB+SIMULINK, в среде LabVIEW и в среде OptiSystem. Представлены результаты моделирования некоторых процессов в каждой из программ, выбрана оптимальная программа, наиболее подходящая для случая проведения моделирования в системе WDM-FSO оценки зависимости коэффициента ошибок в канале связи от различных факторов влияния, исследовательская программа OptiSystem. В программе OptiSystem учтены все составляющие проектируемой атмосферной линии связи, источники и приёмники оптического излучения, имеется широкий выбор тестовых решений по контролю коэффициента ошибок, глаз-диаграммы. Моделирование позволяет определить оптимальные протяжённости линии и выяснить критические условия влияния внешней среды на коэффициент ошибок в канале связи.

В третьей главе **Моделирование и анализ полученных результатов оценки коэффициента ошибок в канале системы WDM-FSO от состояния атмосферы** рассмотрены вопросы причин ослабления сигнала в атмосферной линии связи.

По чисто качественным признакам вышеуказанные причины можно разделить на три основные группы: поглощение и рассеяние молекулами газов воздуха, ослабление на аэрозолях (пыль, дождь, снег, туман) и флуктуации излучения на турбулентностях атмосферы. Поглощение светового потока видимого и инфракрасного диапазонов определяется, прежде всего, молекулярным поглощением, крайне неравномерным по частоте. В разных атмосферных условиях и регионах уровень поглощения будет различаться из-за различного содержания водяных паров и других компонентов воздуха. Имеются участки спектра, где поглощение незначительно, они называются окнами прозрачности. Однако при большем разрешении и в окнах прозрачности существуют целые совокупности различных полос поглощения.

На рисунке 1 приведены кривые ослабления лазерного сигнала в различных аэрозолях.

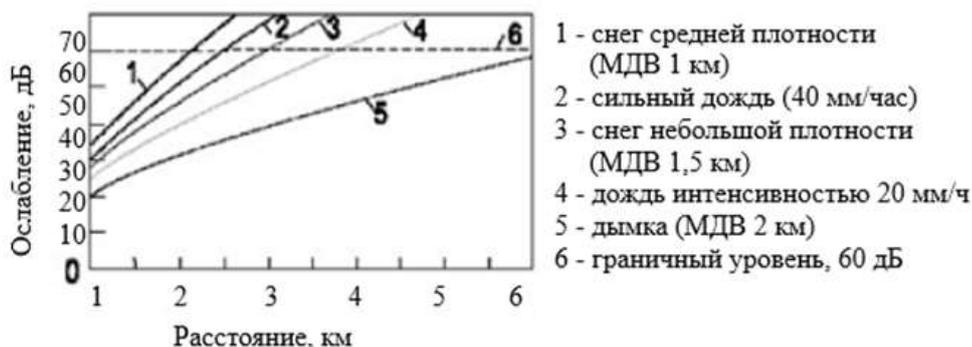


Рисунок 1 – Зависимость ослабления сигнала в аэрозолях от расстояния

На рисунке 1 можно увидеть, что главными ограничителями дальности АЛС являются густой снег и густой туман, для которых аэрозольное ослабление максимально. На распространение лазерного луча сильное влияние оказывает также турбулентность атмосферы, то есть случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха, флуктуациями его температуры и плотности. Поэтому световые волны, распространяющиеся в атмосфере, испытывают не только поглощение, но и флуктуации передаваемой мощности. Турбулентность атмосферы приводит к искажениям волнового фронта и, следовательно, к колебаниям и уширению лазерного пучка и перераспределению энергии в его поперечном сечении.

Иногда возникают замирания сигнала и связь становится неустойчивой. Замирание наиболее сильно проявляется в ясную солнечную погоду, особенно в летние жаркие месяцы, в часы восхода и захода солнца, при сильном ветре. Например, на рисунке 2 показаны две крайние зависимости вероятности ошибок BER для системы атмосферной линии связи Информационно-технологического центра (Новосибирск) от дальности связи при ясной погоде – одна кривая в условиях сильной турбулентности атмосферы (кривая 2), другая – в слабой (кривая 1). Обычные значения BER лежат между этими кривыми.

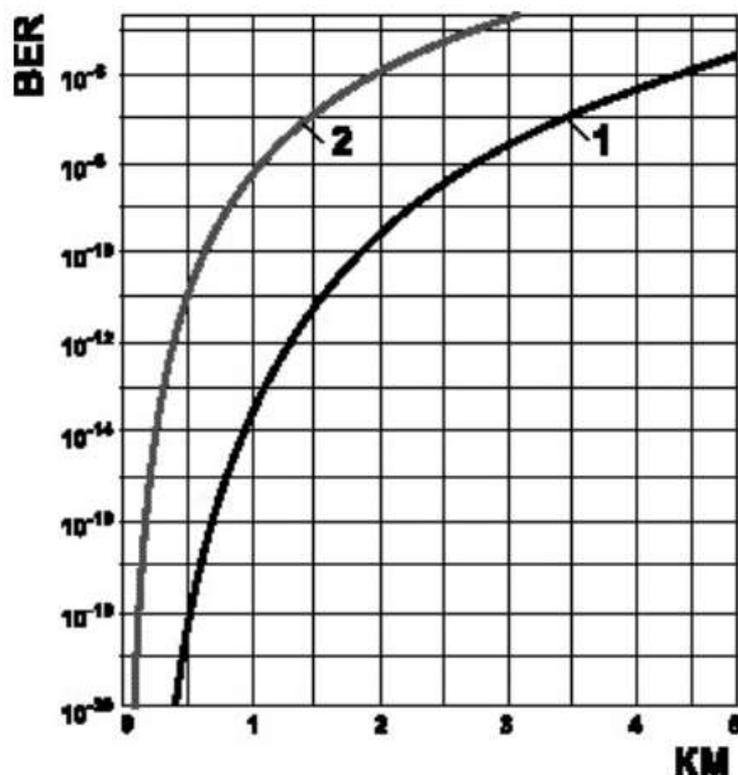


Рисунок 2 – Зависимость вероятности ошибок BER от расстояния при замираниях в атмосфере

С помощью исследовательской программы OptiSystem выполнено моделирование линии связи со спектральным уплотнением каналов по технологии WDM-FSO, определены оптимальные протяжённости линии с заданным числом оптических каналов и скоростными режимами передачи данных в них, проанализированы мощность затухания в различных окнах прозрачности и при различных состояниях атмосферы.

Схема для процесса моделирования для одного канала связи состоит из четырёхпар приёмопередатчиков, каждая пара из которых будет работать на своей длине волны с шагом, соответствующим технологии WDM, мультиплексора и демупльтиплексора.

В качестве среды передачи принята атмосферная оптическая линия связи - моделирующий канал оптики свободного пространства (FSO). В параметрах FSO канала задаются следующие параметры:

- диапазон - расстояние между передатчиком и приемником;
- затухание, вызванное атмосферными воздействиями и геометрическими потерями;
- задержка распространения сигнала;
- диаметр апертуры передатчика - характеристика оптического прибора, описывающая его способность собирать свет;
- диаметр апертуры приёмника;
- расходимость пучка света;
- дополнительные потери - потери из-за сцинтилляции, неправильного наведения.

Уравнение связи выражается зависимостью:

$$P_{Received} = P_{Transmitted} \frac{d_R^2}{(d_T + \theta R^2)} 10^{-\alpha_{10}^R}, \quad (1)$$

- где  $d_R$  – диаметр апертуры приемника, м;  
 $d_T$  – диаметр апертуры передатчика, м;  
 $\theta$  – расходимость пучка света, мрад;  
 $R$  – диапазон, км;  
 $A$  – атмосферное затухание (дБ/км).

Для проверки настройки системы используется оптический анализатор спектра, подключаемый к выходам WDM Мульти WDMmux. Анализатор оптического спектра позволяет контролировать длину волны, расстояние между соседними каналами, а также общие характеристики, такие как мощность, отношение сигнал/шум и другое. Возможно исследовать весь спектральный профиль сигнала в требуемом диапазоне длин волн. Далее профиль отображается на графике в координатах «длина волны - мощность» и для мультиплексированного сигнала системы DWDM можно проанализировать оптические характеристики каждого канала и взаимовлияние разных каналов. На графике отображаются четыре равноудаленных канала (рисунок 3).

Для расчёта производительности системы используем визуализатор BER Analyzer, позволяющий автоматически вычислять и отображать частоту битовых ошибок (BER) сигнала. Визуализатор может оценить BER с помощью различных алгоритмов и вывести различные метрики из глаз-диаграммы, такие как Q-фактор (параметр, непосредственно отражающий качество сигнала), открытие глаз, закрытие глаз, коэффициент экстинкции (показатель ослабления светового потока), высота глаза, дрожание, строить паттерны BER (повторяющиеся участки). В параметрах визуализатора настраиваются: алгоритм, используемый для оценки BER, количество начальных битов, которые должны быть проигнорированы на диаграмме глаз, количество конечных битов, которые должны быть проигнорированы на диаграмме глаз, единица измерения времени для горизонтальной оси, единица измерения отношения (коэффициента) для вертикальной оси, сглаженность (степень плавности перехода между цветовыми градациями), количество вертикальных точек для паттернов.

После запуска моделирования визуализаторы в проекте генерируют графики и результаты на основе входного сигнала, можно получить доступ к графикам и результатам из браузера проектов, из средства просмотра компонентов.

Параметр, характеризующий канал связи – это вероятность принятия ошибочного бита, которая вычисляется как отношение количества ошибочно принятых битов к общему количеству принятых битов (BER – biterro ratio). Этот показатель характеризует только качество приема информации, по нему невозможно определить причину плохой работы. Коэффициент битовых ошибок (BER) КОШ определяется по формуле:

$$K_{\text{ОШ}} = \frac{N_{\text{ОШ}}}{N}, \quad (2)$$

где  $N$  – общее число символов, переданных за интервал измерения;  
 $N_{\text{ОШ}}$  – число ошибочно принятых символов за интервал измерения.

Согласно ITU-T M.2100, качество цифрового тракта по критерию ошибок делят на три категории:

- нормальное –  $BER < 10^{-6}$ ;
- пониженное –  $10^{-6} \leq BER < 10^{-3}$  (предаварийное состояние);
- неприемлемое –  $BER \geq 10^{-3}$  (аварийное состояние).

Так как появление ошибок является следствием совокупности всех текущих условий передачи цифровых сигналов, имеющих случайный характер, то при отсутствии данных о законе распределения ошибок его отдельные элементы могут быть определены с определенной степенью достоверности только по результатам продолжительных измерений. В то же время на практике необходимо, чтобы значения параметров ошибок для ввода в эксплуатацию и технического обслуживания систем передачи основывались на достаточно коротких интервалах времени измерения.

Удобным и простым графическим методом оценки качества цифрового сигнала на выходе регенератора является глаз-диаграмма. Она представляет собой результат наложения всех возможных импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум тактовым интервалам линейного сигнала. Глаз-диаграмма строится путем измерения напряжения в различные моменты времени.

При анализе глаз-диаграммы (рисунок 3) пробная точка ставится в середину глазка, где вероятность возникновения ошибки минимальна, особенно при наличии четкой пологой области. По мере приближения к точке пересечения вероятность появления ошибок растет. Глаз-диаграмма показывает только параметры сигнала. С помощью нее нельзя обнаружить логические ошибки в алгоритмах или протоколах, только ошибки, вызванные большим уровнем помех или искажений в канале передачи. Основными параметрами глаз-диаграммы являются время фронта, время спада, коэффициент раскрытия глазка, высота и ширина глазка, относительная ширина места пересечения. Она может указывать лучшую точку для выборки, показывать SNR (отношение сигнал/шум) в точке выборки и указывать величины джиттера (фазового дрожания) и искажений, изменения по времени при пересечении нуля, что является измерением джиттера.

Джиттер возникает, когда нарастающие и спадающие фронты происходят в моменты, отличные от идеального времени. Некоторые фронты появляются рано, некоторые – поздно. В цифровой схеме все сигналы передаются относительно тактовых сигналов. Отклонение цифровых сигналов в результате отражений, межсимвольных помех, перекрестных помех, влияний изменений напряжения и температуры и других факторов приводит к джиттеру. Некоторый джиттер бывает просто случайным. С увеличением скорости передачи данных абсолютная ошибка по времени представляет собой увеличивающуюся часть периода сигнала, таким образом, уменьшая размер открытия глаза. Это может увеличить вероятность ошибок в данных.

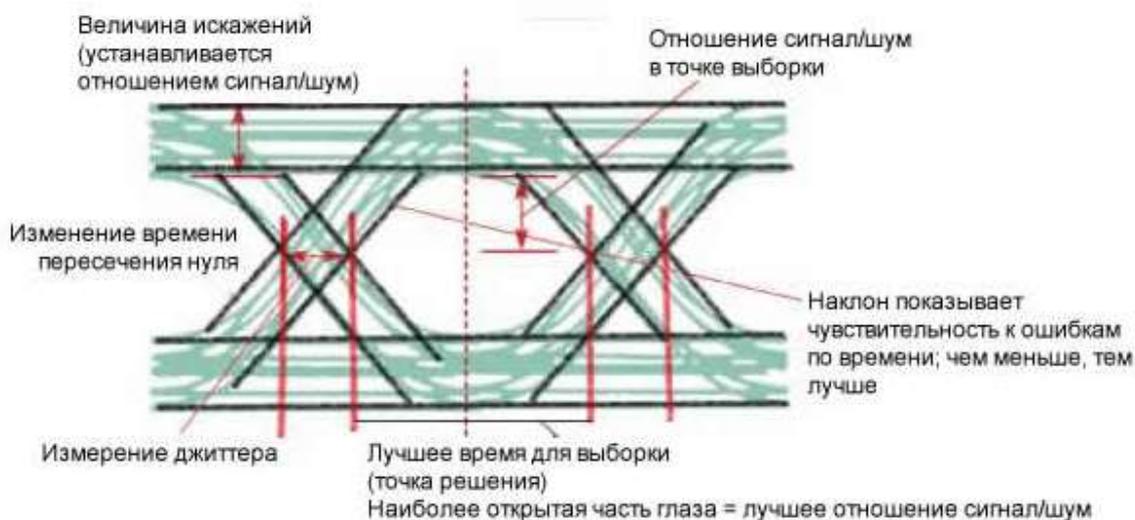


Рисунок 3 – Параметры глаз-диаграммы

Глаз-диаграммы предоставляют мгновенные визуальные данные, которые можно использовать для проверки целостности сигнала в проекте и для выявления проблем на ранних стадиях процесса проектирования. Используемая в сочетании с другими измерениями, такими как частота битовых ошибок, глаз-диаграмма может помочь предсказать производительность и определить возможные источники проблем.

В результате получилась схема модели канала связи с определёнными параметрами компонентов (рисунок 4).

На схеме организовано три линии связи, в каждой линии - по четыре дуплексных канала связи между приёмопередатчиками, каждый из которых работает в инфракрасном диапазоне на своей длине волны через атмосферное пространство (FSO). Для увеличения пропускной способности каналы связи выполнены с мультиплексированием по технологии WDM. Передача данных организована в окнах прозрачности атмосферы (области длин волн с наименьшим коэффициентом затухания): I окно – 850 нм, II окно – 1310 нм, III окно – 1550 нм.

В процессе проведения моделирования для проведения эксперимента изменяется шаг мультиплексирования (соответствует технологии WDM), изменяются протяжённости линий связи, изменяется коэффициент вносимого затухания в канал связи, характеризующий состояние воздушной среды (атмосферы).

Для проверки настройки системы в трех точках одного из каналов каждой линии связи установлены оптические анализатор спектра. Для анализа работоспособности системы, отображения частоты битовых ошибок (BER) в конце тракта каждого канала установлены визуализаторы BER.

#### Эксперимент №1:

- параметры линии связи № 1: протяжённость -3 км, I окно прозрачности – 850 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц (352,6 ТГц, 353 ТГц, 353,4 ТГц, 353,8 ТГц), затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км;

- параметры линии связи № 2: протяжённость -3 км, II окно прозрачности – 1310 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц (228,85ТГц, 229,25ТГц, 229,65ТГц, 230,05 ТГц), затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км;

- параметры линии связи № 3: протяжённость – 3 км, III окно прозрачности – 1550 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц (193,1 ТГц, 193,5 ТГц, 193,9 ТГц, 194,3 ТГц), затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км;

На графиках визуализаторов BER в конце тракта каждого канала в поле цифровых значений отображаются:

- максимальный Q-Фактор;
- минимальный BER;
- максимальная апертура глаза;
- порог;
- момент принятия решения при максимальной добротности/ мин BER.

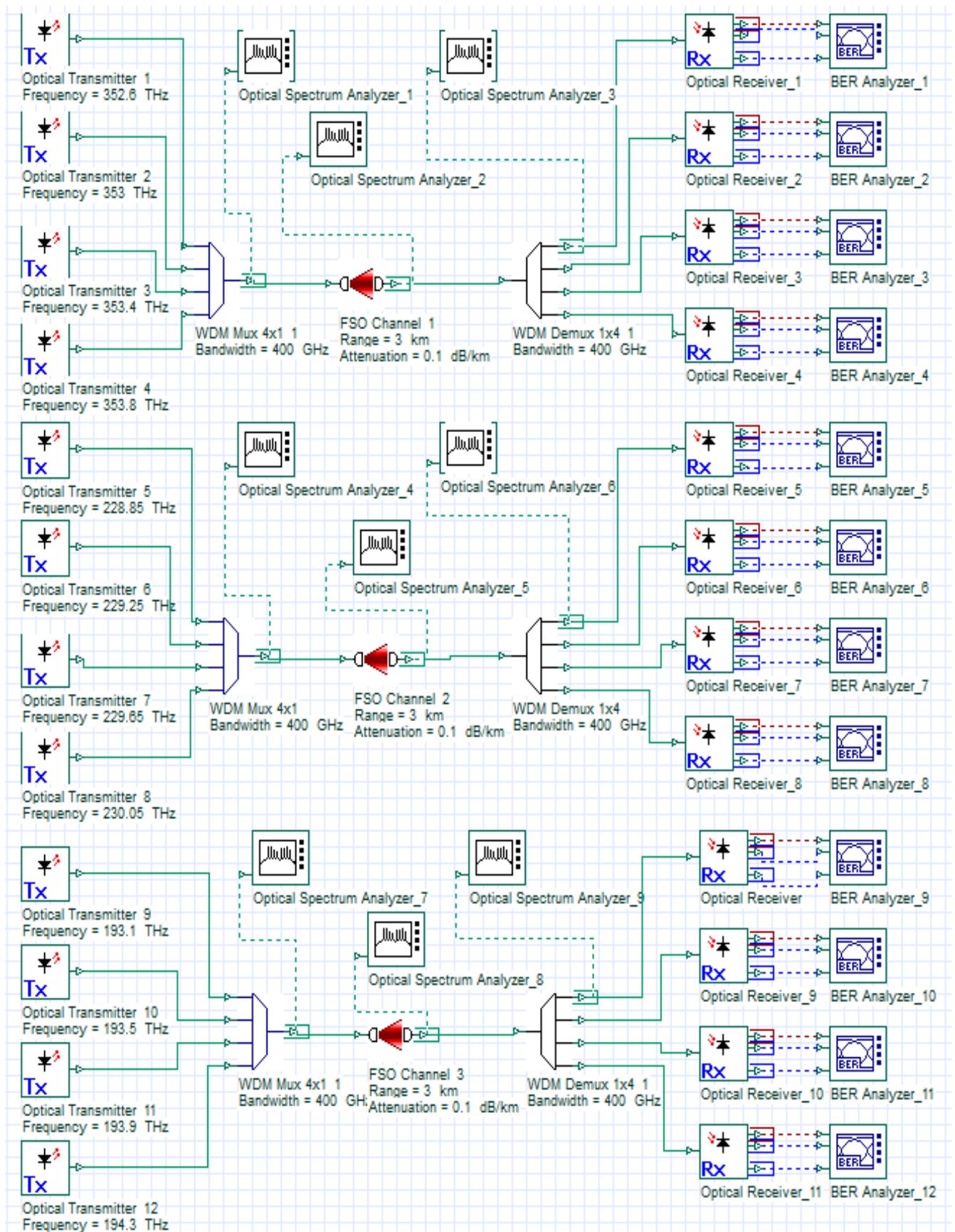


Рисунок 4 – Модель канала связи системы WDM-FSO

Анализируя графики визуализаторов BER 9-12 линии связи № 3, можно сделать вывод, что при одних и тех же параметрах линии связи наибольший коэффициент ошибок наблюдается во втором ( $BER=1,88 \times 10^{-11} \dots 9,11 \times 10^{-16}$ ) и третьем ( $BER=2,53 \times 10^{-11} \dots 1,74 \times 10^{-14}$ ) окнах прозрачности по сравнению с первым окном прозрачности атмосферы ( $BER=8,42 \times 10^{-48} \dots 9,85 \times 10^{-61}$ ). На глаз-диаграммах второй и третьей линий связи присутствуют наибольшие размытости линий, что свидетельствует о наличии шума в канале, чётко видны области с максимальной вероятностью неверного распознавания бита. Но состояние линий связи оценивается как «нормальное».

#### Эксперимент № 2:

- параметры линии связи № 1: протяжённость – 3 км, I окно прозрачности – 850 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 5 дБ/км;

- параметры линии связи № 2: протяжённость – 3 км, II окно прозрачности – 1310 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 5 дБ/км;

- параметры линии связи № 3: протяжённость – 3 км, III окно прозрачности – 1550 нм, шаг мультиплексирования – 400 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 5 дБ/км.

Анализируя графики визуализаторов BER 9 - 12 линии связи № 3, можно сделать вывод, что после ухудшения атмосферных условий (увеличении коэффициента вносимого затухания в канал связи, характеризующего состояние атмосферы) на полученных графиках наблюдается значительная размытость линий, свидетельствующая о наличии шума в канале, коэффициент ошибок в линиях связи увеличился. Глаз-диаграмма сузилась, что свидетельствует о значительной амплитуде отраженных волн. Формы импульса искажены, запаса по помехозащищённости практически нет. Также в линии связи № 3 в данном эксперименте увеличена протяжённость, в результате чего коэффициент ошибок увеличился. Но схема остаётся рабочей, состояние линий связи оценивается как «нормальное».

#### Эксперимент № 3:

- параметры линии связи № 1: протяжённость – 3 км, I окно прозрачности – 850 нм, шаг мультиплексирования – 100 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км;

- параметры канал связи № 2: протяжённость – 3 км, II окно прозрачности – 1410 нм, шаг мультиплексирования – 100 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км;

- параметры канал связи № 3: протяжённость – 5 км, III окно прозрачности – 1550 нм, шаг мультиплексирования – 100 ГГц, затухание, вызванное атмосферными воздействиями – 0.1 дБ/км.

Анализируя графики визуализаторов, можно сделать следующий вывод: при уменьшении шага мультиплексирования до 100 ГГц при прочих равных условиях (по сравнению с Экспериментом № 1, 2) в линии связи № 1 при передаче в окне прозрачности атмосферы I (850 нм), глаз-диаграмма имеет форму, близкую к

идеальной. В канале связи № 2 и № 3 при передаче в окнах прозрачности атмосферы II (1310 нм) и III (1550 нм) соответственно, глаз-диаграммы получились более размытыми, формы импульса искажены, но схемы остаются вполне рабочими. График же визуализаторов BER линии связи № 3 получился аналогичным линии связи № 2, но при увеличении протяжённости тракта до 5 км, получился 100 %-размытыми, схема – не рабочая.

Таким образом уменьшение шага мультиплексирования влияет на качество передачи сигналов во всех окнах прозрачности атмосферы, поэтому чем больше шаг разноса по частоте между каналами связи, тем меньше коэффициент ошибок в канале связи.

Полученные в экспериментах № 1, 2, 3 данные нанесены на графики зависимостей коэффициента ошибок в каналах связи от различных погодных условий (состояния атмосферы) (рисунки 5, 6), которые были получены автором Мазин Али А. Али. В результате можно увидеть, что графики имеют схожий характер. На рисунке 5: кривая 2 – при условиях атмосферы, близких к идеальным, кривая 1 – при внесении атмосферного затухания, связанного с дымкой. На рисунке 6: кривая 2 – при слабом дожде, кривая 1 – при внесении атмосферного затухания, связанного с сильным дождём. Таким образом, коэффициент ошибок возрастает при увеличении протяжённости линии связи и при атмосферном затухании, связанном с аэрозолями (дождь, снег, дымка).

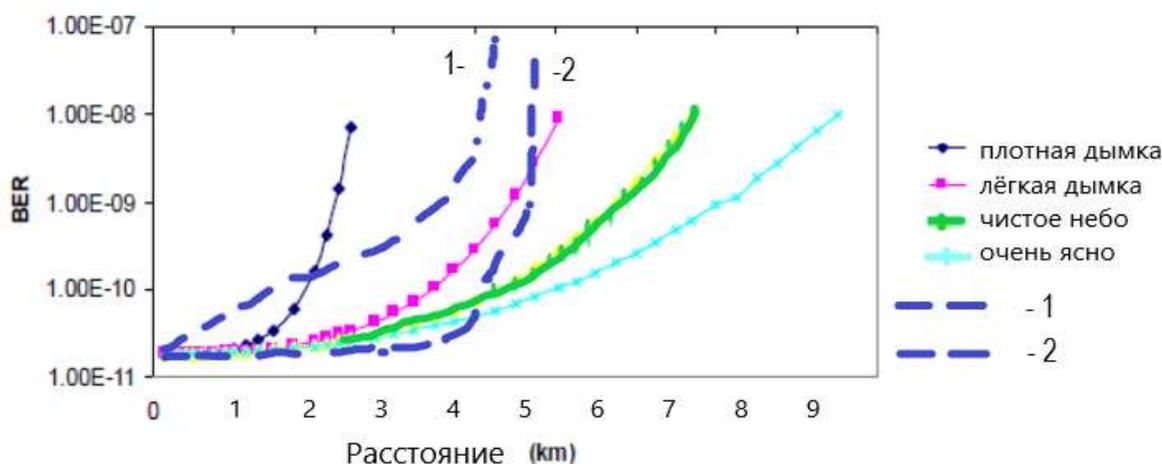


Рисунок 5 – Графики зависимости BER от состояния атмосферы

Работоспособность цифровых систем передачи считается нормальной только в том случае, если коэффициент ошибок не превышает допустимое значение  $BER < 10^{-9}$ .

На первом графике (рисунок 5) следует отметить, что для  $BER 10^{-9}$  дальность передачи ограничена 8 км -для очень ясного состояния атмосферы, 6,5 км – для состояния атмосферы «чистое небо»: 4,5 км – для лёгкой дымки;

2,5 км – для плотной дымки. Можно заметить, что кривые BER уменьшаются с увеличением расстояния передачи и соответственно за счет увеличения коэффициента затухания.

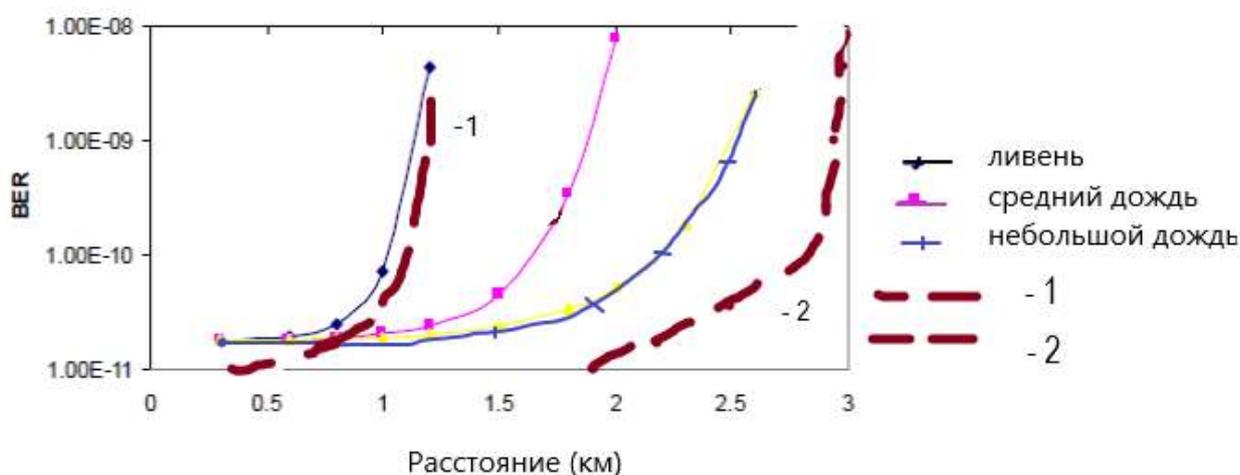


Рисунок 6 – Графики зависимости BER от состояния атмосферы

На втором графике (рисунок 6) видно, что для BER  $10^{-9}$  дальность передачи ограничена 3 км – для небольшого дождя, 2 км – для среднего дождя и 1,0 км – для сильного дождя.

Приведённые графики практически подтверждают проведённые эксперименты по выявлению зависимости коэффициента ошибок (BER) от состояния атмосферы при организации каналов связи в атмосферных оптических линиях связи.

При распространении оптических волн в дополнение к потерям, которые называются потерями в свободном пространстве, даже при ясной погоде наблюдается ослабление в атмосфере, вызванное релеевским рассеянием и/или молекулярным поглощением, влияние которого зависит от длины волны. Отказы линии, возникающие вследствие таких явлений, можно уменьшить за счет регулировки расходимости оптического луча на передающей стороне, таким образом, чтобы диаметр пятна луча на приемной стороне достиг определенного размера.

В случае дождя ослабление возникает в результате геометрического рассеяния, вызванного каплями дождя. Это ослабление не зависит от длины волны, оно зависит от диаметра капель дождя. Для определенных мест расположения и длин линий, возможно оперировать статистическими данными об интенсивности дождевых осадков.

Ослабление вследствие снега зависит от длины волны и интенсивности осадков. Измерение интенсивность снега как параметра осуществляется на метеорологической станции.

Рассматривая принципы функционирования атмосферных линий связи, необходимо учитывать внешние (длина волны, угол расходимости, мощность излучения, чувствительность приёмника, коэффициент битовых ошибок, диаметр апертуры приёмопередатчика, влияние состояния атмосферы) и внутренние (конструкция системы) параметры тракта передачи.

В данной главе смоделирован канал связи, в котором объединены технологии WDM и FSO, разработана схема сети WDM-FSO в программе моделирования OptiSystem, исследована работоспособность спроектированной системы при различных параметрах канала связи, определены оптимальные протяжённости линий с заданным числом оптических каналов и скоростью передачи данных в них, проанализирована мощность затухания в различных окнах прозрачности и при различных состояниях атмосферы, произведена оценка коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы, построены графики зависимостей коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы по результатам проведённых экспериментов. Также подробно описан анализа параметров сигналов посредством глаз-диаграмм. В третьей главе проанализированы особенности функционирования атмосферной оптической линии связи со спектральным уплотнением каналов при ослаблении в аэрозолях (дождь, туман, снег) в различных степенях их проявлений.

Построенные графики зависимости коэффициента ошибок в канале связи в системе WDM-FSO от состояния атмосферы, имеют схожий характер по сравнению с графиками, полученными в результате экспериментов и опубликованными в статье автора Мазин Али А. Али [43].

В результате анализа экспериментов, проведённых и описанных в третьей главе, можно сделать вывод о возможности передачи нескольких каналов связи со спектральным уплотнением по атмосферной оптической линии связи. Но при этом коэффициент ошибок при протяжённости линии связи, близкой к 5 км, получается достаточно большим, то есть сигнал на приёмной стороне будет искажённым. Для того, чтобы уменьшить коэффициент ошибок, необходимо, как вариант, применение мультиплексоров с параметрами, стремящимися к идеальным, а также установка дополнительных фильтры. Доказательством применения неидеального мультиплексора являются спектрограммы, отображающие на выходе демультиплексоров присутствие достаточно мощной энергии соседних каналов – разница составляет всего 7 дБ (норма – 20-30 дБ).

Построенная в среде OptiSystem имитационная модель учитывает протяжённость проектируемого канала связи, длину волны и окно прозрачности атмосферы, в котором осуществляется передача сигналов, шаг мультиплексирования, затухание, вызванное атмосферными воздействиями.

Вышеуказанную модель возможно использовать на этапе проектирования систем для атмосферных линий связи и сделать выводы о её работоспособности в определённых местностях и при определённых условиях реализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации проанализирована и подробно описана система организации каналов связи по атмосферным оптическим линиям с применением технологии WDM.

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы:

- рассмотрены и проанализированы процессы моделирования в среде MATLAB+SIMULINK, в среде LabVIEW и в среде OptiSystem, представлены результаты моделирования некоторых процессов в каждой из программ, выбрана оптимальная программа, наиболее подходящая для случая проведения моделирования системы WDM-FSO;

- спроектирован канал связи, в котором объединены технологии WDM и FSO;

- разработана схема сети WDM - FSO в программе-эмуляторе OptiSystem;

- исследована производительность запроектированной системы при различных параметрах канала связи;

- определены оптимальные протяжённости линий связи с заданным числом оптических каналов, при заданной скорости передачи данных в них;

- на основании анализа окон прозрачности атмосферы сделан вывод об оптимальной области прозрачности атмосферы, используемой для организации каналов WDM-FSO с минимальными потерями;

- произведена оценка коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы;

- получены графики зависимостей коэффициента ошибок в системе WDM-FSO от состояния атмосферы, которые имеют схожий характер с графиками зависимостей, полученными в результате экспериментов и опубликованными в статье автора Мазин Али А. Али [43];

- получены глаз-диаграммы, характеризующие параметры сигналов;

- проанализированы особенности функционирования атмосферной оптической линии связи при ослаблении в аэрозолях – дождь, туман, снег в различных степенях проявлений.

В результате выполнения диссертационной работы выполнена задача по исследованию процесса влияния состояния атмосферы на коэффициент ошибок в канале связи технологии WDM-FSO.

Полученные результаты позволят реализовать сеть связи WDM-FSO с применением существующих компонентов ВОСП, характеризующуюся минимальными потерями при передаче сигналов, с учётом географических особенностей местности и статистических показателей вероятности возникновения аэрозольного влияния. Скомпилированные при проведении экспериментов файлы возможно использовать для проведения лабораторных практических работ.

В результате, поставленная цель магистерской диссертацией достигнута.

Система связи WDM - FSO эффективна для обеспечения высокой скорости передачи данных с низкой частотой битовых ошибок (BER) на коротких участках.

Она обеспечивает передачу большого количества информации с высокой надежностью на расстояниях до 3 км, эффективно решает проблему "последней мили".

Научная новизна ожидаемых результатов заключается в получении графиков зависимости коэффициента ошибок канала связи системы WDM-FSO от состояния атмосферы.

Практическая ценность ожидаемых результатов заключается в разработке схемы сети WDM-FSO в программе OptiSystem, которая позволит скомпилировать файл для проведения лабораторно-практических работ; полученные результаты позволят реализовать сеть связи WDM-FSO с применением существующих компонентов ВОСП.

Теоретический материал будет применён в лекционных занятиях кафедры МЭС. Разработанные схемы можно применить на лабораторных работах и практических занятиях студентов, обучающихся в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики» г. Екатеринбурга.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Тобышева С.В. Факторы, влияющие на качество сигнала в беспроводных атмосферных оптических линиях связи [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «E-Scio.ru». –Режим доступа: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/11/Тобышева-С.-В.pdf>.

2 Тобышева С.В. Параметры, оказывающие влияние на работоспособность FSO систем / С.В. Тобышева //Научно-практические исследования. –2020.- № 11-1. – С. 34.