

На правах рукописи



Огнев Борис Игоревич

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО
МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ**

Специальность:

1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: **Чуляева Елена Георгиевна**, доктор технических наук, профессор базовой кафедры «Технологии электронной компонентной базы» ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Степанов Владимир Анатольевич**, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики ФГБОУ ВО «РГУ имени С.А. Есенина», г. Рязань

Коренский Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, директор Центра физического приборостроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», г. Троицк

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»**, г. Самара

Защита диссертации состоится 08 июня 2023 г. в 11.30 на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте университета www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02, д.ф.-м.н.



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследование распространения лазерного излучения через атмосферу особенно актуально для проектирования и эксплуатации оптических средств лазерной дальнометрии, высокоточного пространственного сканирования и систем оптической беспроводной связи как на Земле, так и в каналах Земля-Космос, в реальных условиях динамически изменчивой турбулентности атмосферы над неоднородной структурой подстилающей поверхности: город, водные преграды, промышленные зоны и т.п.

Современное развитие науки и техники требует повышения как скорости сканирования объектов, так и точности измерения расстояния фазовым методом при сканировании с точностью до долей миллиметров. Такое решение возможно только при увеличении частоты модуляции лазерного излучения до 10 ГГц. Аналогичные требования возникают и для систем оптической связи. При этом необходимо обеспечить симметричное прохождение оптического сигнала в обоих направлениях по одной воздушной трассе и по одной оптической оси. С ростом частоты модуляции требуется повышать собираемую мощность на приёмных устройствах, а для оптимизации измерительного канала возникает необходимость в сужении диаграмм направленностей передающих и приёмных оптических апертур до долей миллирадиан. Это, в свою очередь, требует высокоточного совмещения оптических осей пространственно-разнесённых лазерных модулей системы. Учитывая, что оборудование эксплуатируется в широком температурном диапазоне, необходимо принимать во внимание возможную разъюстировку измерительного канала из-за деформации оснований, на которые устанавливаются лазерные модули, и автоматически компенсировать отклонения оси диаграммы направленности в реальном режиме времени.

В процессе работы систем лазерное излучение проходит через атмосферу, тем самым в измерительный канал вносятся оптические помехи. Стохастическое изменение уровня мощности, вызванное турбулентностью атмосферы, приводит к выходу сигнала за пределы динамического диапазона приёмника, что снижает достоверность полученных данных в процессе работы систем.

При создании новых перспективных лазерных систем необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований в части выбора оптимальных технических и алгоритмических решений для работы лазерных приборов как в лабораторных, так и в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, на сегодняшний день актуальными являются научно-технические задачи по созданию инженерно-конструкторских решений, позволяющих осуществить симметричную передачу и приём лазерных сигналов по одной оптической оси, а также разработку и обоснованию алгоритмов, обеспечивающих прецизионно точное совмещение осей диаграмм направленности и высокую достоверность принятых информационных сигналов в условиях динамически меняющейся атмосферы и сильной фоновой засветки.

Степень разработанности темы. Вопросы распространения лазерного излучения в условиях турбулентной атмосферы рассмотрены в работах В.Е. Зуева,

А.М. Обухова, А.С. Гурвича, В.И. Татарского, П.В. Короленко, А.М. Зотова, И.И. Мохова, В.П. Лукина, С.Г. Гаранина, С.Н. Кузнецова и др. В работах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по вопросам оптики турбулентной атмосферы, рассмотрены вопросы влияния атмосферной турбулентности на лазерное излучение, методы определения параметров турбулентности с помощью флуктуаций лазерного излучения. Анализ состояния проблемы свидетельствует о том, что теоретическое описание физических механизмов процессов, протекающих в турбулентной атмосфере при прохождении лазерного излучения, требует в каждом случае проверки экспериментальными исследованиями. Современный уровень понимания природы распространения лазерного излучения в атмосфере допускает как различные интерпретации экспериментальных результатов, так и построение разных моделей описания физических процессов в атмосфере и приборах, например, обеспечивающих высокоскоростную оптическую связь.

Поиск путей решения задачи проведения широкого спектра экспериментальных исследований по распространению высокочастотного лазерного излучения в атмосфере при создании новых оптических систем с частотой модуляции до 10 ГГц является актуальным и востребованным. Важным вопросом остается реализация возможности мультиспектрального излучения и приёма оптических лазерных сигналов без их электрооптического и оптоэлектронного преобразования, используя законы геометрической оптики, что обеспечит «прозрачность» измерительного канала для широкого спектра сигналов.

Цель работы: создание аппаратно-программного комплекса для исследования распространения в турбулентной атмосфере лазерного излучения с расширенным до 10 ГГц диапазоном частоты модуляции.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

- проведение анализа существующих конструкций лазерных систем с учётом особенностей их эксплуатации;
- исследование и разработка оптической схемы и конструкции волоконно-оптического приёмопередающего тракта лазерного терминала с учётом возможности применения геометрической оптики и волнового мультиплексирования нескольких оптических сигналов;
- анализ и обоснование разработки собственного алгоритма определения центра пятна, принимаемого координатным датчиком от маяка удаленного терминала экспериментальной установки с учётом особенностей её работы в условиях турбулентной атмосферы и паразитных оптических помех;
- оценка эффективности выбранных конструктивных решений экспериментальной установки с учетом законов геометрической оптики и воздействия турбулентной атмосферы, выработка решений, позволяющих увеличить достоверность данных экспериментов.

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы применялись аналитические методы, методы математического и компьютерного моделирования. Теоретические методы применялись в совокупности с экспериментальными исследованиями по приёму и передаче оптических сигналов в различных погодных условиях и на различных дистанциях.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые на основе алгоритма определения центра пучка разработана система пространственной стабилизации оси диаграммы направленности приемо-передающего лазерного модуля, позволяющая улучшить характеристики лазерных систем за счёт увеличения в 2 раза точности работы датчика оси диаграммы направленности (ДОДН) в условиях сильных оптических помех, характерных для систем, работающих в условиях атмосферы.

2. Предложен и впервые реализован способ вывода одномодового оптического излучения в атмосферу и его приёма по одной оптической оси, обеспечивающий разделение принимаемого и передаваемого сигналов на одной длине волны более 60 дБ.

3. Предложен и впервые реализован способ согласования распределения мод лазерного модулированного излучения в оптоволокне с его дальнейшим излучением в атмосферу и многомодовым приёмом по одной оптической оси.

4. Впервые разработан алгоритм, определяющий оптимальное значение излучаемой мощности удалённым терминалом на основе экспериментально определяемого статистического образа краев вероятностного распределения, позволивший снизить частоту появления ошибочных битов в измерительном канале экспериментальной установки.

5. Проведен анализ конструктивных решений оптической схемы экспериментальной установки по снижению воздействия турбулентности атмосферы, влияющего на качество проводимых измерений, и показано, что одним из способов является применение многомодового волокна в тракте приёма-передачи.

6. Впервые реализована конструкция узла ввода-вывода лазерного терминала на основе волоконно-оптического дуплексера, примененного в экспериментальной установке и позволившего использовать технологию геометрической оптики и волнового мультиплексирования для повышения частоты модуляции лазерного излучения до 10 ГГц на одной длине волны в диапазоне 1530 – 1560 нм.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Оптическая система, построенная с использованием оптоволоконного дуплексера, обеспечивает в одной апертуре одновременный вывод одномодового излучения в диапазоне 1530 – 1560 нм и приём при параллельной передаче до 10 оптических сигналов с частотой модуляции до 10 ГГц.

2. В условиях сильных оптических помех автоматическая коррекция оптической оси диаграммы направленности приемо-передающего лазерного

модуля, построенная с использованием дифференциально-интегрального алгоритма нахождения абонента, снижает погрешность угла отклонения от направления на удалённый терминал в 2,5 – 10 раз.

3. Динамическая подстройка мощности излучения удалённого терминала, реализованная на основе статистически определяемого положения точки стабилизации, в 5 раз уменьшает уровень ошибок в измерительном канале.

Практическая значимость подтверждается созданием экспериментальной установки, позволившей провести исследования по распространению высокочастотного лазерного излучения с частотой модуляции до 10 ГГц через атмосферу. Созданный оптоволоконный дуплексер может быть использован в качестве ключевого узла моноапертурных оптических схем лазерных приборов, для работы которых требуется приём и передача мультиплексированных сигналов через атмосферу по одной оптической оси, а предложенный способ динамической стабилизации мощности на приёме позволит повысить степень достоверности принимаемых данных. Предложенный в диссертационной работе алгоритм определения центра пятна излучения, принимаемого координатным датчиком от удаленного терминала экспериментальной установки, способен обеспечить увеличение скорости и точности определения маяка в системах автоматического прецизионного наведения при работе в условиях сильных оптических помех.

Внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационной работы были использованы в разработках АО «Мостком», г. Рязань (в моделях М1-GE-L, М1-10GE и М1-40GE), в исследовательской работе Миланского политехнического института, Италия (с использованием измерительной установки проводилось изучение распространения лазерного излучения в атмосфере на длинах волн 785 нм и 1550 нм в различных погодных условиях), в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов работы обеспечиваются непротиворечивостью их фундаментальным положениям распространения световых волн, физической обоснованностью используемых моделей, строгостью математических и численных методов, согласованностью с материалами других авторов, качественным согласием с данными экспериментов и практическим внедрением.

Личный вклад автора. Основные результаты исследований по созданию лазерного модуля беспроводной оптической связи: разработка конструкторских решений устройств, оптических схем, алгоритмов, систем автоматического регулирования, программного комплекса, экспериментальные исследования и испытания были выполнены автором.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.2. «Приборы и

методы экспериментальной физики» по следующим пунктам паспорта специальности:

- п.2. разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений;
- п.3. разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики;
- п.4. разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики.

Апробация результатов работы. Основные результаты настоящей работы докладывались: на XXIII, XXV, XXVI, XXVIII Международной научно-технической конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте» (Новороссийск, 2015, 2017, 2018, 2020); Международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании-2018» (Рязань, 2018).

Публикации. По материалам работы опубликовано 16 печатных работ, из них 6 статей опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определённых ВАК РФ, 2 работы в изданиях входящих в реферативную базу данных Scopus, 8 работ в материалах международных научно-технических конференций, 1 патент на изобретение РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений, демонстрирующих уровень и значимость результатов работы. Общий объем работы 157 страниц машинописного текста, включая 70 рисунков, 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные решаемые задачи, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе обсуждаются общие принципы и технологии беспроводной оптической передачи данных через атмосферу, включая системы с использованием передающих лазерных устройств с излучением в ближней ИК области, обладающих высокой скрытностью, защищённостью канала от несанкционированного доступа, возможностью установки в сложных, труднодоступных для проводных линий связи местах.

Анализируются факторы, влияющие на качество и параметры работы лазерных систем, атмосферные явления: ветер, туман, осадки (снег, дождь), излучение солнца; соответствие длин волн излучения лазера атмосферным окнам прозрачности атмосферы; параметры и свойства лазерного излучения: средняя и пиковая мощность, расходимость, модовая структура, вид и уровень модуляции

светового потока, габариты, потребляемая мощность, долговечность, устойчивость к механо-климатическим воздействиям.

Обсуждаются возможности использования подвижных приёмопередающих устройств, принципы их конструирования: пути повышения дальности, частоты модуляции в лазерном оптическом канале; проблемы согласования излучателей и передатчиков.

Анализируются параметры и возможности: различных типов оптических приемников; одноканальной и дуплексной приёмо-передачи, конструкций систем наведения. Итогами первой главы являются выводы с предложениями по повышению качества, надежности, устойчивости к внешним воздействиям лазерных измерительных каналов, расширению области их применения.

Во второй главе описано создание *лазерного модуля экспериментальной установки для исследования распространения лазерного излучения через атмосферу*. Экспериментальная установка состоит из двух приёмопередающих лазерных модулей, двух блоков интерфейсов и комбинированных кабелей, обеспечивающих обмен контрольной информацией, передачу сигналов управления и подачу питания в лазерный модуль. Упрощенная функциональная блок-схема экспериментальной установки лазерного модуля представлена на рисунке 1.

Для работы приемопередающего лазерного модуля используются две длины волны и соответственно реализовано деление:

- на служебный (контрольный) канал (длина волны 785 нм), который отвечает за точное наведение и передачу служебных данных о состоянии удаленного терминала, работу системы автоматической поддержки оси диаграммы направленности и точное позиционирование лазерных модулей относительно друг друга на различных дистанциях;

- измерительный канал (длина волны 1530 – 1560 нм), который используется для передачи сгенерированных сигналов от каналобразующего оборудования и имеет большой потенциал для наращивания пропускной способности за счёт применения волнового мультиплексирования нескольких потоков сигналов.

Диапазон 1530 – 1560 нм попадает в «окно прозрачности» атмосферы, соответствует стандарту безопасности, допускающему использование большей плотности мощности излучения лазера без риска для здоровья, и обеспечивает соблюдение норм лазерной безопасности, предусмотренных для данного типа оборудования.

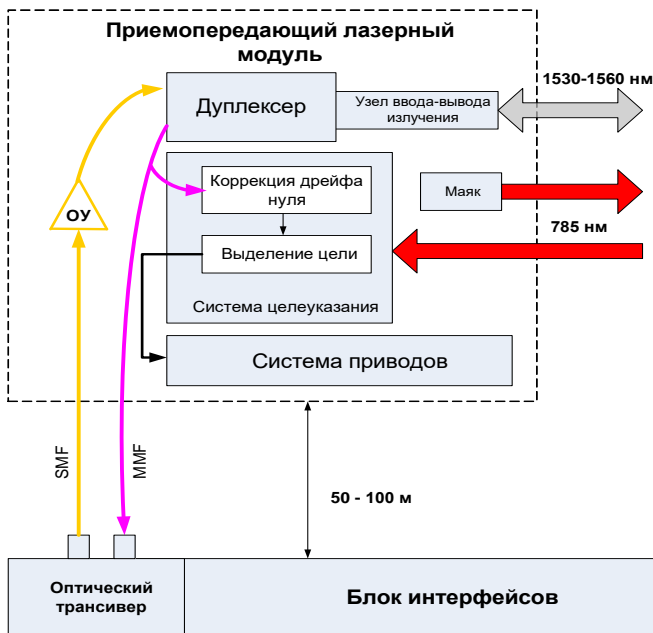


Рисунок 1 – Функциональная блок-схема лазерного модуля

В качестве устройства ввода/вывода излучения используется специально обработанный срез кварцевого многомодового градиентного волокна с диаметром сердцевины 62,5 мкм, закрепленного в феруле. Для преобразования одномодового лазерного излучения в многомодовое разработан оптоволоконный дуплексер специального типа, соединяющий одномодовое волокно с диаметром сердцевины 62,5 мкм и числовой апертурой NA 0.275.

Формирование поля излучения происходит с помощью схемы разнесения оптических путей, объединяющих одномодовый (ОМ) выход с многомодовым (ММ) входом оптического излучения. Применение волоконно-оптического дуплексера упрощает конструкцию и осуществляет прием и передачу по одной оптической оси.

Устройство моностатической лазерной системы (рисунок 2) содержит: фотоприемник 1, присоединенный к оптическому волокну 2; источник одномодового излучения 3, соединенный с оптическим волокном 4; дуплексер 5, соединенный оптическими волокнами с одной стороны с фотоприемником 1, с другой стороны с источником одномодового излучения 3; выход дуплексера соединен с приемопередающим оптическим волокном 6 (дуплексер при этом обеспечивает разделение передаваемого и принимаемого излучений). Дуплексер изготовлен на основе сварного соединения многомодового волокна, соединенного

с фотоприемником. Третье оптическое волокно 6, с другой стороны от дуплексера оптически соединено под углом альфа с приемопередающей моностатической оптической системой.

Волокна 2 и 4 оптически соединены между собой. Оптическое волокно 4, соединенное с источником излучения 3, оптически соединено с боковой поверхностью оптического волокна 2, соединенного с фотоприемником 1, под углом α , отсчитываемым от оптического волокна 2, соединенного с фотоприемником 1, при условии, что

$$\sin(\alpha) < \frac{NA2}{n2} - \frac{NA1}{n1}, \quad (1)$$

при этом срез третьего волокна 6, оптически соединенный с приемопередающей моностатической оптической системой 7, отшлифован под углом β к поверхности, перпендикулярной своей оси при условии, что

$$\frac{1}{n2} - \frac{NA2}{n2} > \sin(\beta) > \frac{NA2}{n2}, \quad (2)$$

где $NA2/n2 > NA1/n1$ и $D2 > D1$.

Согласно этим условиям, угол β не должен превышать угла полного внутреннего отражения для всех мод в многомодовом волокне.

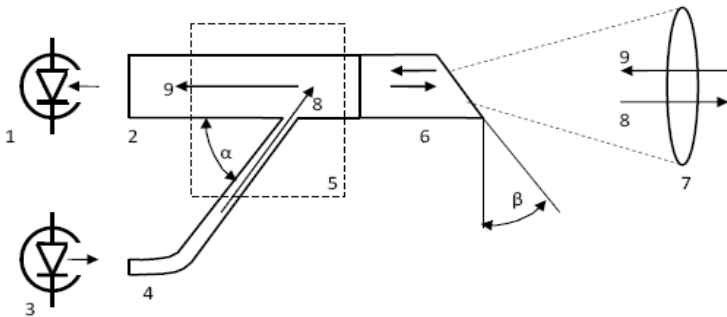


Рисунок 2 – Устройство моностатической лазерной системы: 1 – фотоприемник; 2 – оптическое волокно, присоединенное к фотоприемнику; 3 – источник одномодового излучения; 4 – оптическое волокно, присоединенное к источнику излучения; 5 – дуплексер; 6 – приемопередающее оптическое волокно; 7 – приемопередающая моностатическая оптическая система; 8 – передаваемое одномодовое излучение; 9 – принимаемое многомодовое излучение.

Проведённый подбор оптических волокон 2, 4 и 6 по показателю преломления и конструктивным их расположениям (углы α и β) обеспечил малые потери излучения в канале передатчика и приёмника, а также разделение каналов более 60 дБ.

Описывается создание системы автоматической корректировки оси диаграммы направленности лазерных модулей экспериментальной установки. Анализируется процесс реальной эксплуатации с учётом возникающей временной нестабильности опорных конструкций. Показана необходимость постоянного автоматического пространственного наведения одного передающего модуля на другой. Определены требования к реализации и конкретные данные по диапазону автонаведения лазерного модуля, обусловленные изменением пространственного положения и углов ориентации лазерного модуля под влиянием температуры, механических вибраций и колебаний, ветровых нагрузок и возмущений, изменением геометрии опор вследствие старения.

Реализована система пространственной стабилизации (СПС). Луч лазера, поступающий на фотоприёмник, попадает на фотоприёмное устройство (ФПУ), состоящее из КМОП матрицы, сигналы от которой обрабатываются с помощью ПЛИС. Корректировка положения оптической конструкции осуществляется с помощью шаговых электродвигателей (рисунок 3).

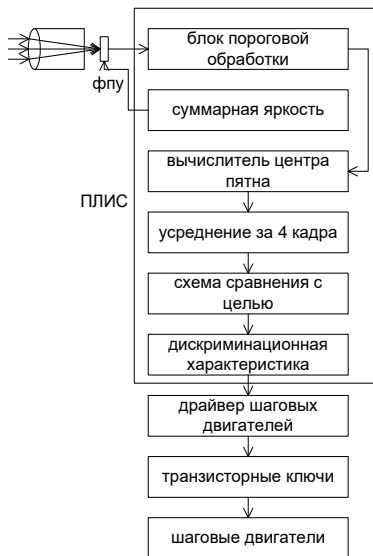


Рисунок 3 – Структурная схема системы СПС датчика оси диаграммы направленности

Для управления положением оптической рамы используются два шаговых электродвигателя, по одному для каждой оси. Шаговые двигатели, используемые в системе СПС, являются основным средством коррекции направленности ОДН лазерного модуля. Главное преимущество шаговых приводов - обеспечение высокой точности на уровне 10^{-5} рад. Использование СПС на практике позволило: повысить бюджет измерительного канала; существенно упростить и сократить до минут процесс наведения системы при вводе в эксплуатацию; использовать оборудование на нестабильных конструкциях.

Описано создание *блока интерфейсов*, обеспечивающего питание лазерного модуля, обмен сигналами телеконтроля и телеуправления с внешним компьютером через сервисный стык и подключение каналобразующего оборудования. Представлены результаты разработки платы интерфейса с возможностью подключения 4-х приёмопередатчиков на основе SFP+ модулей с

частотой модуляции до 10 ГГц каждый, использования оптоволоконного дуплексера, объединяющего в одной апертуре вывод одномодового излучения на длине волны 1550 нм в атмосферу и приём сигнала на такой же длине волны от удалённого лазерного модуля.

Описывается разработанное **универсальное монтажное устройство для крепления лазерных модулей**, обеспечивающее надёжную установку и эксплуатацию оптических систем в реальных условиях без предварительного обследования места установки. Оно позволяет установить лазерные терминалы на различные виды поверхностей: горизонтальные, вертикальные, наклонные поверхности и на трубостойки различного диаметра; крепление выносных приборов радио- и оптоэлектронной аппаратуры.

Третья глава посвящена натурным испытаниям, исследованиям и совершенствованию экспериментальной установки, создание которой описано во второй главе.

Показано, что **формирование поля излучения** происходит с помощью разнесения оптических путей, объединяющего одномодовый (ОМ) выход с многомодовым (ММ) входом оптического излучения, выполненными **в виде оптоволоконного дуплексера**. Применение дуплексера позволяет осуществлять прием и передачу измерительного канала по одной оптической оси и на одной длине волны, упрощает требования к стабильности конструкции лазерного модуля в реальных условиях эксплуатации. На выходе дуплексера формируется многомодовое излучение, которое обеспечивает лучшее прохождение сигнала в условиях турбулентной атмосферы. Такое решение позволяет на приёмной стороне уменьшить диапазон колебаний сигнала в среднем на 10 dB.

Работоспособность системы пространственной стабилизации оси диаграммы направленности (ОДН) проверяется на экспериментальном стенде, блок-схема которого приведена в диссертации и может быть продемонстрирована несколько упрощённой схемой использования координатного датчика в экспериментальной установке (рисунок 4).

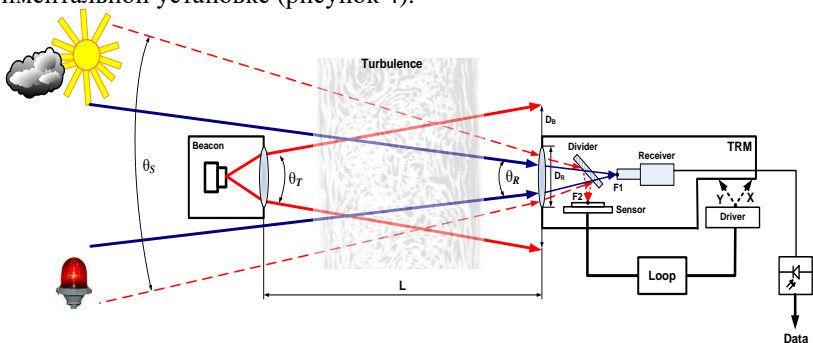


Рисунок 4 – Схема использования координатного датчика в экспериментальной установке

Оптическая система лазерного модуля (TRM) задаёт угловое поле зрения приёмника и концентрирует излучение маяка в точку F1, где расположен фотоприёмник информационного канала. Часть принятого оптического сигнала с помощью делительного элемента (Divider) попадает в сопряжённую с фотоприёмником точку F2, где размещается позиционно-чувствительный датчик (Sensor). Угловое поле датчика θ_R обычно значительно превышает угловое поле зрения θ_R информационного приёмника.

Лазерные системы работают в самом широком диапазоне условий эксплуатации. Дальность работы L может изменяться от сотен метров до сотен километров. В поле зрения канала наведения попадают мощные источники фона как естественного (солнце), так и промышленного происхождения (вспышки, блики). При распространении света в атмосфере на него воздействуют все неоднородности канала: турбулентность среды, рассеивающие реагенты и т.п. Под влиянием атмосферы в плоскости приёма пучок сильно искажается. Эти искажения проявляются в изменениях угла его падения на лазерном модуле (TRM), деформации формы пучка, «пляске» изображения в фокальной плоскости, а также в сильном ослаблении сигнала.

Анализ результатов исследования показывает, что система пространственной стабилизации (СПС) позволяет достаточно точно определять координаты центра лазерного пятна даже при значительных изменениях мощности поступающего излучения как в большую, так и в меньшую стороны. Экспериментальные результаты по исследованию работы СПС в реальных условиях иллюстрируют записи текущих значений параметров системы в течение двух часов сразу после захода солнца.

Показано, что почти сразу после захода солнца происходит кратковременное смещение опоры, а спустя ещё час начинается непрерывное смещение, которое СПС вынуждена компенсировать. При этом смещение координаты центра пятна служебного канала в результате корректирующей работы СПС не превышает 1,25 пикселя. Изменения мощности излучения на приемнике рабочего канала на длине волны 1550 нм не происходит благодаря своевременному срабатыванию СПС. Наблюдаемые колебания мощности после захода солнца связаны уже с возникающей нестабильностью параметров атмосферы, в основном с турбулентностью.

Представлены результаты разработки *эффективного алгоритма выделения центра пучка* для экспериментальной установки, обеспечивающего высокую точность определения положения маяка и устойчивость работы в условиях шума и паразитной засветки.

Исходя из условий работы датчика оси диаграммы направленности (ДОДН), составлена расчётная модель для определения эффективности использования различных алгоритмов выделения центра пятна. Модель состоит из двух частей: блока описания входных воздействий, включая полезный (информационный) сигнал, и набора алгоритмов по решению целевой задачи.

Описываются и сравниваются алгоритмы определения цели.

Алгоритм BR4. Алгоритм основан на поиске первой производной в массиве входных значений.

Алгоритм третьей производной (D3). Алгоритм основан на развитии дифференциального подхода.

Интегральный поиск (ИП). Для поиска центра пятна используется интегрирование интенсивностей по всему вектору входных значений.

Дифференциально-интегральный алгоритм нахождения абонента (ДИАНА). Алгоритм специально разработан для работы в условиях высокого уровня помех (рисунок 5).

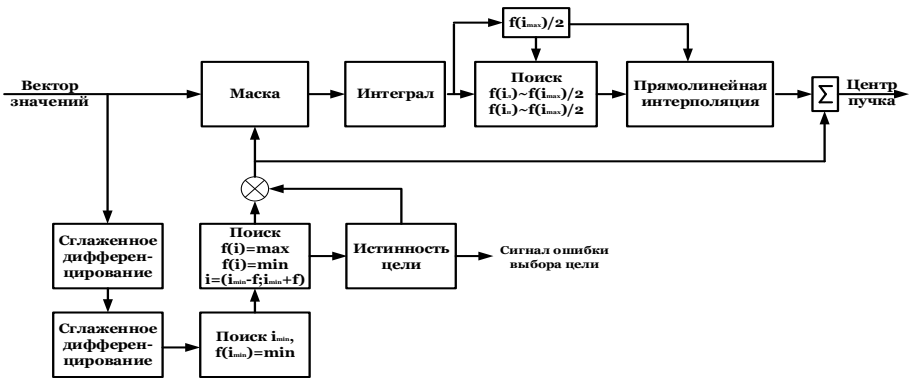


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма ДИАНА

Центр пятна определяется по узловым точкам с использованием линейной интерполяции. Сравнение эффективности работы алгоритмов проводилось по двум критериям: точность определения цели и устойчивость работы в условиях наличия шума и паразитной засветки. Разработанный алгоритм успешно использован в работе СПС экспериментальной установки.

С ростом частоты передаваемого сигнала динамического диапазона стандартных для волоконной оптики приёмников становится недостаточно. Разброс входного сигнала после прохождения через турбулентную атмосферу выходит за границы рабочего диапазона приёмника, что приводит к появлению ошибок в измерительном канале и снижает достоверность полученных экспериментальных данных. Частоту выхода сигнала за пределы динамического диапазона приемника можно компенсировать за счёт автоматического выбора оптимального среднего уровня сигнала на приеме из атмосферы. Для оптимизации измерительного оптического канала и уменьшения потерь в турбулентной атмосфере введено управление усилителем удалённого терминала и разработан

алгоритм управления точкой стабилизации (ТС) усилителя (рисунок 6). Принцип его работы показан ниже (рисунок 7).

Статистика собирается за $N=30000$ измерений приемной мощности:

LowIN – счетчик измерений мощности меньше внутренней границы минимума.

LowOUT – счетчик измерений мощности меньше внешней границы минимума.

HighIN – счетчик измерений мощности больше внутренней границы максимума.

HighOUT – счетчик измерений мощности больше внешней границы максимума.

NL – результат статистики минимальной мощности.

NH – результат статистики максимальной мощности.

P_{TC} – значение точки стабилизации принимаемой мощности.

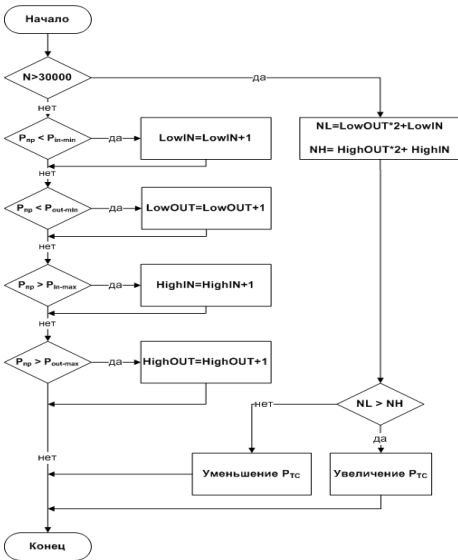


Рисунок 6 – Алгоритм управления точкой стабилизации

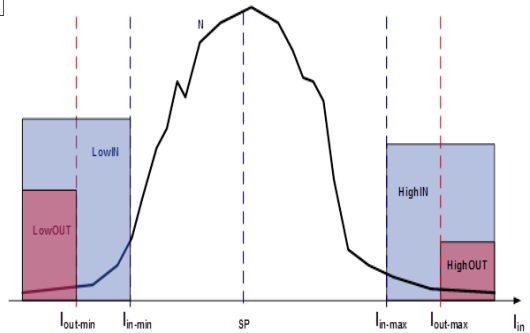


Рисунок 7 – Иллюстрация принципа работы алгоритма управления ТС

Алгоритм динамической подстройки точки стабилизации подтвердил свою работоспособность на практике и обеспечил выход к оптимальным значениям ТС (рисунок 8).

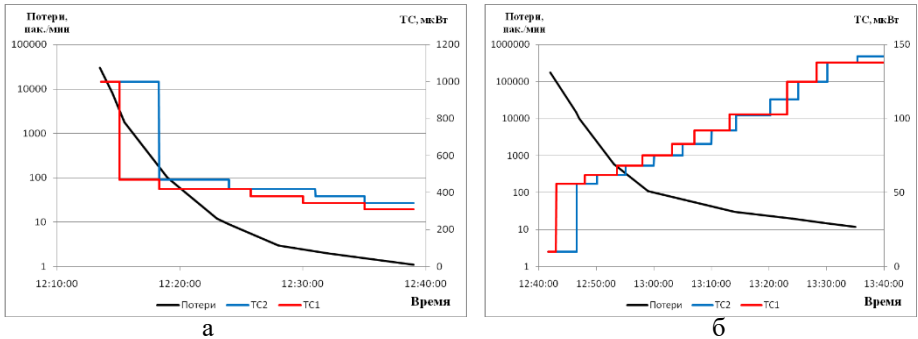


Рисунок 8 – Динамика изменения ТС на терминалах экспериментальной линии 620 м, а также уровня потерь при заданном высоком (а) и низком (б) начальном значении ТС

В ходе сравнительных экспериментов на дистанции 620 м уровень ошибок в период измерений за 24 часа без использования алгоритма составлял $5 \cdot 10^{-10}$, при использовании предложенного алгоритма его значение снизилось до $9 \cdot 10^{-11}$.

Приведены результаты *экспериментов на реальных условиях*:

- 1) протяжённость трассы 1,6 и 2,8 км, измерения на частоте 10 ГГц;
- 2) протяжённость трасс 620 м; 1,6 км; 2,8 км, параллельные измерения четырёх каналов по 10 ГГц;
- 3) протяжённость трассы 21 км, измерения на частоте 1 ГГц.

Заключение

На основе многолетних исследований в рамках кандидатской диссертации созданы теоретические, конструкторско-технологические и экспериментальные основы для создания установки по исследованию распространения высокочастотного лазерного излучения через атмосферу. Получены следующие новые научные результаты:

- разработана экспериментальная установка для проведения автоматизированных исследований распространения лазерного излучения по принципу моноапертурной передачи и приёма информационного канала в диапазоне длин волн 1530 – 1560 нм с использованием оригинальных научно-технических решений, обеспечена возможность передачи через атмосферу на различные дистанции и приём оптических сигналов с целью отработки и создания новых оптических приборов и систем;

- впервые на основе законов геометрической оптики разработана оптическая схема волоконно-оптического тракта и доказана высокая эффективность созданного оптоволоконного дуплексера, обеспечившего возможность использования технологии волнового мультиплексирования и

параллельную работу до 10 оптических измерительных каналов оптической по 10 ГГц каждый;

- впервые разработаны обеспечившие высокую точность и надежность работы системы пространственной стабилизации (СПС) и всего лазерного модуля алгоритмы: определения центра пятна на ФПУ для корректировки оси диаграммы направленности; динамического определения цели (прицеливания и наведения), управления точкой стабилизации мощности на приемном устройстве; нахождения абонента (цели) – ДИАНА – в условиях турбулентной атмосферы и механических воздействий;

- в качестве параметра эффективности алгоритма определения центра пучка для системы наведения оборудования беспроводной оптической связи в условиях воздействия случайных помех используется коэффициент ошибки целеуказания;

- автоматическая коррекция оптической оси прибора в случае её смещения под воздействием внешних факторов позволяет использовать систему с меньшим углом расходимости излучения, снять ограничения по установке лазерных модулей на нестабильные металлические конструкции (мачты, вышки и др.); автоматизировать и существенно облегчить проведение исследований, в разы снижает время, затрачиваемое на запуск экспериментов;

- разработаны оптическая и интерфейсная части экспериментальной установки; компьютерные программы и алгоритмы (наведения и сопровождения); устройство монтажное универсальное, представляющее собой металлическую жесткую и надёжную площадку для крепления оптического и оптоэлектронного оборудования, обеспечили возможность масштабирования технологии под созданные изделия разного назначения для применения на мобильных и манёвренных объектах (комплексах), а также для систем космического базирования.

Результаты диссертационной работы применены в изделиях, разрабатываемых в АО «Мостком», г. Рязань, внедрены в производство АО «Государственный Рязанский приборный завод». Это позволило создать новые модели АОЛС М1-10GE, М1-20GE, М1-30GE, М1-40GE, которые по пропускной способности не имеют аналогов в мире.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В рецензируемых изданиях из перечня ВАК:

1. Огнев Б.И., Боев А.А., Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю. Алгоритм определения центра пучка для системы наведения беспроводной оптической связи // Вестник РГРТУ. – 2015. – №54. – Часть 1. – С. 55–59.

2. Огнев Б.И., Керносов М.Ю., Чуляева Е.Г. Система пространственной стабилизации оси диаграммы направленности лазерного излучения в атмосферной линии связи // Научно-технический журнал «Фотоника». – 2016. – №4 (выпуск 58). – С. 68–78.

3. Огнев Б.И., Боев А.А., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Паршин А.А. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с // Вестник РГРТУ. – 2017. – №62. – С. 44–48.

4. Огнев Б.И., Чуляева Е.Г., Кузнецов С.Н. Концепция построения сети беспроводной оптической связи между надводными кораблями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2018. – Т.11. – № 1. – С. 66–72.

5. Огнев Б. И., Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Паршин А. А. Снижение уровня ошибок при передаче высокочастотных оптических сигналов в условиях турбулентной атмосферы за счет использования статистики уровня приемного сигнала // Научно-технический журнал «Фотоника». – 2020. – том 14 (выпуск 5). – С. 424–436.

6. Огнев Б.И., Складчиков С.А., Чуляева Е.Г. Влияние турбулентности атмосферы на распределение оптических сигналов с длиной волны 1550 нм // Вестник РГРТУ. – 2021. – №78. – С. 198–203.

В изданиях, включенных в реферативную базу «Scopus»:

7. Огнев Б., Кузнецов С., Поляков С., Юрко С. Wireless communications at 10Gb/s // SPIE Newsroom. – 2014. – Май. DOI: 10.1117/2.1201405.005486.

8. Огнев Б. И., Керносов М. Ю., Кузнецов С. Н., Паршин А. А. Technology for error reduction in the high-frequency optical signal transmission in a turbulent atmosphere through the use of statistical patterns // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). – 2020. – Июль. DOI: 10.1117/1.OE.59.7.076118.

Сборники трудов международных конференций:

9. Огнев Б.И., Боев А.А., Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю. Датчик оси диаграммы направленности для беспроводных оптических систем связи // XXIII Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – С. 72–73.

10. Огнев Б.И., Керносов М.Ю., Чуляева Е.Г. Устройство автоматического контроля оси диаграммы направленности лазерного излучения в атмосферной оптической линии связи // XXIII Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – С. 73–74.

11. Огнев Б.И., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю. Анализ эффективности конструктивных решений оборудования высокоскоростной оптической беспроводной связи с учётом воздействия турбулентной атмосферы // XXV Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2017. – С. 118–120.

12. Огнев Б.И., Боев А.А., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Паршин А.А. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с // XXV

Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2017. – С. 120.

13. Огнев Б.И., Боев А.А., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю., Чуляева Е.Г., Широбакин С.Е. Анализ эффективности конструктивных решений в лазерном модуле устройства атмосферной линии связи // XXVI Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2018. – С.165.

14. Огнев Б.И., Боев А.А., Баскакова А.В., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю., Широбакин С.Е. Электромагнитная система стабилизации // XXVI Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2018. – С.107.

15. Огнев Б.И., Хромченко Н.С., Чуляева Е.Г. Анализ эффективности конструктивных решений в лазерном модуле устройства атмосферной линии связи // Сборник трудов II МНТК и МНМК «СТНО-2018». Том 2. – Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 33–37.

16. Огнев Б.И., Складчиков С.А., Чуляева Е.Г. Влияние турбулентности на распространение оптических сигналов с длиной волны 1550 нм // XXVIII Международная научно-практическая конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте». – Новороссийск: ГМУ имени Ф.Ф. Ушакова. – 2020. – С.71–73.

Патент РФ:

17. Огнев Б.И., Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Паршин А.А. Способ регулирования уровня сигнала на приёмнике терминала оптической беспроводной связи // Патент РФ-2019 - № 2688664.

Огнев Борис Игоревич

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО
МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

**Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина.**

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.