

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА» (РУТ (МИИТ))

На правах рукописи



ЧЫОНГ ДИНЬ ХОП

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Журавлёва Любовь Михайловна

МОСКВА – 2026

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ..	11
1.1 Актуальность создания сети связи с беспилотными летательными аппаратами на базе атмосферной оптической связи (АОС)	11
1.2 Области применения атмосферной оптической связи	13
1.3 Использование беспилотных летательных аппаратов в телекоммуникационных сетях	20
1.4 Особенности использования беспроводных атмосферных каналов в инфракрасном диапазоне для связи с беспилотными летательными аппаратами .	22
1.5 Выводы по главе	31
ГЛАВА 2 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ	33
2.1 Особенности функционирования канала связи с беспилотными летательными аппаратами на базе АОС	33
2.2 Способ организации беспроводных оптических сетей с беспилотными летательными аппаратами с использованием спутниковой навигации	35
2.3 Расчет вероятности ошибки в распознавании контура проекции конуса света на фотоматрице.....	41
2.4 Система регулировки оптического баланса АОС с использованием данных спутниковой системы навигации	45

2.5 Выводы по главе	49
ГЛАВА 3 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ БЕЗ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ	51
3.1 Способ организации беспроводных оптических сетей с беспилотными летательными аппаратами без спутниковой системы навигации	51
3.2 Особенности организации беспроводного оптического канала связи между стационарным пунктом управления и беспилотным летательным аппаратом	55
3.3 Структура системы двусторонней оптической связи между стационарным пунктом управления и беспилотными летательными аппаратами	57
3.4 Алгоритм регулировки оптического баланса атмосферной оптической связи в отсутствии спутниковой навигации	61
3.5 Модель компьютерного зрения и искусственной нейросети для распознавания и восстановления проекции конуса света на фотоматрице в условиях турбулентности	63
3.6 Методика расчета пространственных координат беспилотного летательного аппарата	68
3.7 Выводы по главе	73
ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ	75
4.1 Актуальность задачи повышения качества сигналов АОС	75
4.2 Анализ оптического бюджета атмосферной оптической связи	78

4.3 Перспективные материалы оптоэлектроники для высокочувствительных фотоприемников АОС	79
4.4 Математическое моделирование оптоэлектронных характеристик нового материала на базе сверхрешёток	81
4.5 Количественная оценка влияния новых материалов на качество канала АОС.....	86
4.6 Выводы по главе	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	112
ПРИЛОЖЕНИЕ В	136
ПРИЛОЖЕНИЯ Г	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) успешно применяются в разных областях хозяйственной деятельности. Они широко используются в системах мониторинга окружающей среды, видеонаблюдения за стратегическими объектами, ретрансляции сигналов телекоммуникационных сетей и т.д. Для выполнения перечисленных выше функций необходимы каналы связи оператора с БПЛА. Такая двусторонняя связь в настоящее время организуется в радиодиапазонах. Системы радиосвязи позволяют создать необходимое электромагнитное поле для приема сигнала при движении объекта на достаточно большой территории. Однако активное применение электромагнитного подавления сигнала требует создания таких каналов связи, которые сохраняли бы преимущества радиосвязи, но не реагировали бы на преднамеренные помехи средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Такую задачу предлагается решить путем перехода на атмосферную оптическую связь (АОС) в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн. Атмосферная оптическая связь не подвержена электромагнитным помехам, совместима с радиосистемами, имеет достаточно развитую элементную базу оптоэлектроники. Поэтому с помощью АОС возможна организация двустороннего канала связи между БПЛА (беспилотником) и оператором (центром управления). Однако для этого требуется решить задачи, связанные с ограниченной дальностью АОС, сложностью захвата и сопровождения луча лазера при установлении канала с подвижным объектом. Эти проблемы возникают главным образом из-за значительных потерь в атмосфере (затухания за счет поглощения и рэлеевского рассеяния света) и турбулентности (нестабильного движения воздушных масс). Перечисленные выше атмосферные явления ухудшают качественные показатели АОС. Поэтому энергетические потери от них необходимо компенсировать, чтобы обеспечить устойчивую беспроводную атмосферную оптическую связь между БПЛА и оператором.

Кроме того, для создания системы беспроводной оптической связи с подвижным объектом необходимо постоянно отслеживать: 1) направления

оптических осей канала; 2) нарушения оптического баланса между модемами АОС. Решить перечисленные выше задачи и реализовать канал связи между оператором и БПЛА предлагается путем оценки координат беспилотника в центре управления и использования этой информации для настройки передатчика оператора. Для этого требуется разработать: 1) методику расчета координат БПЛА; 2) способ настройки излучения лазерного передатчика оператора в направлении приемника БПЛА. В отсутствии спутниковой навигации предлагается производить оценку координат по проекции конуса света на фотоматрице (ФМ) приемника оператора, восстановленной с помощью искусственной нейросети (ИНС). Разработанная методика расчета координат БПЛА основана на анализе геометрических и энергетических параметров проекции лазерного излучения на ФМ приемника. Расчеты выполняются с помощью систем уравнений, составленных в первом случае на основании измеренных координат трех точек проекции конуса света (диагоналей эллипса) на плоскости ФМ, во втором случае на основании измеренных величин накопленного заряда пикселей тех же трех точек. Полученные данные используются для формирования направления лазерного излучения в сторону приемника БПЛА.

За счет изменений условий распространения света возможны ошибки в результатах расчетов координат БПЛА по оптическому балансу. Погрешность вычислений двумя способами предлагается использовать для подстройки мощностей лазерных передатчиков модемов АОС с целью регулирования оптического бюджета.

Наиболее сложным вопросом является формирование направления оптической оси лазера в передатчике оператора по рассчитанным координатам БПЛА. Эту задачу предлагается решить с помощью оптической фазированной антенной решетки (ОФАР), аналогично той, что используется в радиосвязи. В результате разработан вариант ОФАР в виде полусферы из световодов (фотонно-кристаллического волокна ФКВ) в сочетании с жидкими кристаллами (нематитами) и схемы управления антенной. Показано, что наилучшие показатели

(по качеству и доступности АОС) можно достигнуть с помощью новой элементной базы оптоэлектроники.

В основе диссертации лежат теоретические и прикладные исследования Зуева В. Е., Зеленюк Ю. И., Огнева Б. И., Казанцева С. Ю., Полякова С. Ю., Полтавского А. В., Karen Anderson, Kevin J. Gaston, Yiqing Zhang.

Целью диссертационной работы является разработка методов организации устойчивой связи с беспилотными летательными аппаратами на основе атмосферных оптических каналов ИК-диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **научные задачи**:

1. Исследовать особенности формирования и распространения оптических сигналов лазерных передатчиков в ИК-диапазоне.
2. Провести анализ способов сопровождения оптических осей в каналах атмосферной оптической связи.
3. Предложить метод организации двустороннего канала АОС между оператором и БПЛА с учетом проблем сопровождения конуса света.
4. Определить структурные схемы систем атмосферной оптической связи с БПЛА в ИК-диапазоне в зависимости от наличия или отсутствия спутниковой навигации.
5. Разработать алгоритм подстройки оптического баланса АОС.
6. Найти вариант восстановления проекции конуса света на ФМ.
7. Дать рекомендации по повышению качественных характеристик АОС.

Объектом исследования является атмосферный оптический канал связи с БПЛА в ИК-диапазоне.

Предметом исследований являются научные методы организации атмосферного оптического канала связи с БПЛА в ИК-диапазоне

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методы организации атмосферных оптических каналов связи с БПЛА в ИК-диапазоне для разных погодных условий и устойчивых к атмосферным помехам;

2. Методика расчета направления оптической оси восходящей связи путем оценки координат БПЛА по проекции конуса света на ФМ приемника оператора, позволяющая при условии использования новой элементной базы оптоэлектроники обеспечить для канала АОС коэффициент доступности $K \geq 0,999$.

3. Методика расчета направления оптической оси восходящей связи путем оценки координат БПЛА с помощью уравнения оптического баланса АОС, позволяющая осуществить регулировку оптического бюджета с вероятностью ошибки различения соседних пикселей ФМ не более $P_{ош} \leq 10^{-3}$.

4. Схема управления мощностью лазерного передатчика, позволяющая адаптивно подстраивать оптический баланс при изменении условий в атмосфере с помощью вычислений погрешности позиционирования БПЛА по проекции конуса света, восстановленной с помощью ИНС.

5. Алгоритм отслеживания оптических осей конусов света с помощью ОФАР по рассчитанным координатам БПЛА.

Научная новизна.

В рамках диссертационного исследования получены новые научные результаты, имеющие большое значение для разработки методов организации связи с БПЛА с помощью атмосферных оптических каналов:

1. Метод организации связи в отсутствии спутниковой навигации с помощью ОФАР и расчета координат БПЛА по проекции конуса света на ФМ оператора.

2. Методики оценки координат БПЛА с помощью проективной геометрии и расчетных формул оптического баланса АОС.

3. Метод регулирования оптического баланса, основанный на разнице результатов в расчетах координат БПЛА методами проективной геометрии и составления уравнения оптического баланса АОС.

4. Структура и схема управления ОФАР на основе ФКВ и жидких кристаллов.

5. Алгоритм восстановления проекции конуса света на ФМ с помощью ИНС.

Методы исследований основаны на теориях: передачи сигналов, математического моделирования, вероятностей, оптоэлектроники и физики полупроводников, мезоскопической физики, переноса ИК-излучения в атмосфере, рэлеевского рассеяния, атмосферной оптики.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена корректной постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, подтверждена использованием апробированного математического аппарата, математическим моделированием, сравнением прогнозируемых результатов с расчетами вычислительных и натурных экспериментов.

Теоретическая значимость научных результатов заключается в создании методов организации каналов атмосферной оптической связи с БПЛА в условиях атмосферных помех, методиках расчета координат БПЛА с помощью проективной геометрии и уравнения оптического баланса, схеме регулировки оптического бюджета АОС, разработке конструкции ОФАР в виде полусферы на основе световодов из ФКВ и жидких кристаллов.

Практическая значимость:

1. Разработана структурная схема системы АОС с БПЛА, в которой предусмотрена подстройка оптического баланса с учетом погоды.
2. Предложен метод отслеживания оптических осей конусов света с помощью ОФАР на основе вычисленных координат БПЛА.
3. Получены новые технические решения реализации ОФАР на основе ФКВ и нематитов, управляемых с помощью специальной матрицы.

Результаты работы внедрены в учебный процесс при изучении дисциплин «Каналообразующие устройства телекоммуникационных устройств и систем», а также используются на железнодорожном транспорте Вьетнама при проведении научно-исследовательских работ, что подтверждено актами внедрения полученными от Ханойского университета транспорта и Управления железнодорожного транспорта Вьетнама.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации

соответствует пунктам 1,11,18 паспорта специальности 2.2.15 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлены на 8 Международных научно-практических конференциях (МНПК): VII МНПК «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика», г. Уфа, 2021; III МНПК «Интеллектуальные транспортные системы», г. Москва, 2024; XV МНПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», г. Иркутск, 2024; МНПК «Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта», г. Екатеринбург, 2024; МНПК «Транспортные системы», г. Санкт-Петербург, 2024; XIII МНПК «Проблемы безопасности на транспорте», г. Гомель, 2024; XXVII МНПК «Современные исследования: теория, практика, результаты», г. Москва, 2026; XVII МНПК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ 2026, г. Владимир, а также в 15 публикациях, из них в 4 статьях в научно-технических журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ для защиты кандидатских диссертаций, 1 патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 65 наименований, списка сокращений, приложений с актами о внедрении, иллюстрируется 11 таблицей и 47 рисунками, изложена на 159 страницах.

Личное участие. Основные теоретические результаты получены автором лично, в том числе: структурная схема АОС с БПЛА; расчеты координат БПЛА по проекции конуса света на ФМ; математическое моделирование энергетических характеристик сверхрешеток для ФМ. Постановка цели и задач исследований, обсуждение полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

ГЛАВА 1 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

1.1 Актуальность создания сети связи с беспилотными летательными аппаратами на базе атмосферной оптической связи (АОС)

В последние десятилетия наблюдается беспрецедентное развитие информационных технологий и телекоммуникаций, которое вызвало экспоненциальный рост глобального трафика данных и, соответственно, потребности в его высокоскоростной передаче [1] [2]. Современные технологии, охватывающие широкий спектр приложений – от потокового видео сверхвысокой четкости (UHD 4K/8K) и облачных вычислений до Интернета вещей (IoT), систем искусственного интеллекта, виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности – всё острее нуждаются в высокопроизводительных и надежных сетях связи. Особое место занимают технологии организации связи беспроводной связи с беспилотными объектами (наземными, летательными и т.д.), которые широко применяются на транспорте, а также мониторинга безопасности окружающей инфраструктуры, в телекоммуникациях. Эти потребности затрагивают ключевые сектора экономики и общественной жизни, включая телекоммуникации (особенно в контексте развертывания сетей 5G и будущих 6G), научные исследования (передача больших объемов экспериментальных данных), а также индустрию развлечений и медиа.

Одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений в современных коммуникационных технологиях является организация связи между беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Учитывая огромные потребности в пропускной способности каналов связи и сложную электромагнитную обстановку, наиболее целесообразным является использование атмосферной оптической связи (АОС), также известной как Free Space Optics (FSO), которая имеет следующие преимущества [3]:

1) рост потребностей и возможностей в высокоскоростной передаче данных. Так, современные приложения, такие как потоковое видео в высоком разрешении, виртуальная и дополненная реальность, а также приложение для работы с большими данными, требуют передачи огромных объёмов информации с минимальными задержками. Традиционные методы, основанные на радиочастотных технологиях, часто не могут обеспечить требуемую пропускную способность и качество соединения из-за ограниченности спектра, и интерференции сигналов. АОС использует свет в оптическом диапазоне для передачи данных и способна предоставлять более высокую пропускную способность по сравнению с радиочастотными каналами;

2) гибкость, мобильность и оперативность развертывания инфраструктуры. Использование БПЛА в качестве мобильных узлов связи обеспечивает беспрецедентную гибкость;

3) минимизация инфраструктурных затрат и временных издержек. Развертывание традиционных оптоволоконных линий требует значительных капиталовложений в прокладку кабеля (включая земляные работы, получение разрешений) и занимает длительное время (месяцы и годы);

4) оптические каналы практически не подвержены радиочастотным помехам и не создают их сами, что позволяет использовать их в сложных условиях электромагнитного влияния;

5) поддержка экстренных служб и обслуживания удалённых объектов. Сети АОС на базе БПЛА могут быть оперативно развернуты для обеспечения необходимой связью аварийно-спасательные службы в зонах катастроф. Они также представляют собой надёжное средство для удалённого мониторинга и управления объектами, такими как нефтедобывающие платформы, удалённые медицинские учреждения и другие объекты критической инфраструктуры.

Однако необходимо отметить, что технология АОС для связи с БПЛА сталкивается с рядом трудностей, в том числе [3]:

1) зависимость от атмосферных условий: туман, дождь, снег, дымка и атмосферная турбулентность могут ослаблять или искажать лазерный луч, снижая дальность и надежность связи;

2) сложности с наведением и стабилизацией. Поддержание точного взаимного наведения оптических терминалов между движущимися БПЛА или между БПЛА и наземной станцией является сложной технической задачей, требующей высокоточных систем стабилизации и слежения;

3) энергопотребление и время полета. Мощные лазеры и сами БПЛА потребляют значительное количество энергии, что ограничивает время нахождения БПЛА в воздухе. Разработка более энергоэффективных компонентов и БПЛА с большей продолжительностью полета является важным направлением исследований;

4) регуляторные вопросы. Использование воздушного пространства БПЛА и безопасность лазерного излучения требуют соответствующего правового регулирования.

Таким образом, создание и совершенствование систем атмосферной оптической связи для связи с БПЛА – это не только актуальное направление развития технологий, но и стратегически важный шаг к формированию гибкой, высокопроизводительной и безопасной коммуникационной среды XXI века. Эта инновационная технология гармонично интегрируется с существующими проводными и радиочастотными сетями. Она предлагает уникальные решения для широкого спектра задач. Продолжающиеся исследования и разработки открывают новые перспективы для инноваций и повсеместного внедрения этой перспективной технологии в различных сферах.

1.2 Области применения атмосферной оптической связи

Сегодня наиболее востребованными являются беспроводные технологии передачи информации, традиционно использующие радиосредства. Однако, ресурсы дециметрового частотного диапазона для высокоскоростных

телекоммуникационных систем почти исчерпаны. Дальнейшее увеличение скорости передачи сигналов возможно только при условии освоения более высоких частот. Именно поэтому стандарты мобильной связи 5G и 6G рассчитаны на сантиметровый диапазон [4]. Радикальное решение повышения пропускной способности заключается в переходе на инфракрасный диапазон частот с длиной волны 1–2 мм и меньше. Активное применение цифровых каналов атмосферной оптической связи АОС (FSO) в «окнах прозрачности» волоконно-оптических линий началось в 2000-х гг. За основу передачи цифрового сигнала через атмосферу (или космическое пространство) была принята модуляция излучения в не лицензируемом (инфракрасном или видимом) диапазоне длин волн с последующим его детектированием оптическим фотоприемным устройством [5]. Требование прямой видимости луча света от лазера накладывает определенные ограничения на высоту установки и направленность приемопередающих устройств.

Оптимальный диапазон высоты – расстояние от уровня крыш самых высоких зданий до нижней границы зоны облачности. Важными моментами при установке оборудования являются минимизация апертуры и обеспечение точной направленности излучения передатчика. По мере распространения лазерного луча его границы размываются, поэтому приемники и передатчики монтируются на опорах конечной жесткости. Пример оборудования АОС, смонтированного на уровне крыши дома, представлен на рис. 1.1 [6].



Рисунок 1.1 – Оборудование атмосферной оптической связи, смонтированное на уровне крыши дома [6]

Повышенный интерес к АОС особенно в последнее время объясняется такими уникальными свойствами беспроводной оптической связи, как сложность обнаружения оптического сигнала, невозможность перехвата сообщений и подавления связи средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Благодаря скорости и удобству развертывания каналов такая технология широко используется в локальных сетях аэропортов, правительственных учреждений, при организации временных коммуникаций во время проведения разных мероприятий, например, автогонок «Формула 1». Реализацией проектов в области FSO занимаются известные отечественные и зарубежные институты, в том числе Институт проблем передачи информации РАН, Московский технический университет связи и информатики, Рязанский государственный радиотехнический университет и др. Области применения АОС представлены на рисунке 1.2 [7].

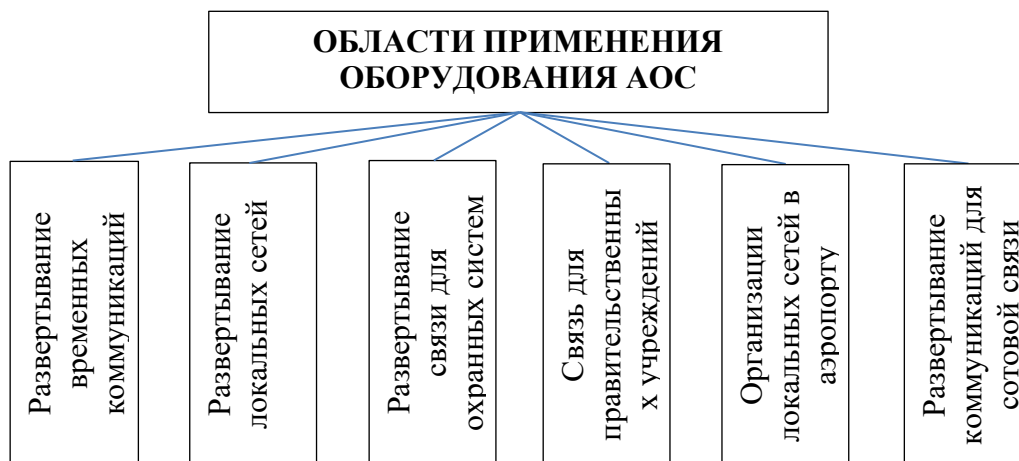


Рисунок 1.2 – Области применения атмосферной оптической связи [7]

Следует отметить, что одна из важнейших технических задач, поставленная правительством РФ – развитие космической связи на основе технологии АОС для организации каналов между спутниками. Вместе с тем, модемы АОС применяются в сетях мобильной связи в качестве каналов между базовыми станциями. Для ретрансляции сигналов между беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) также может использоваться инфракрасный диапазон, не подверженный воздействию средств РЭБ. Реализация такого проекта возможна при условии создания оптических модемов, способных организовать уверенную связь между подвижными объектами. Решением такой задачи в настоящее время

занимаются все ведущие мировые научные центры. Перспективность АОС объясняется возможностями производства элементной базы, гарантирующей выполнение требуемых показателей качества и надежности для передачи высокоскоростной информации. Канал АОС обеспечивает величину вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-9}$ и коэффициента доступности 0,999 на расстоянии не более 1 км [7]. Однако зависимость от состояния атмосферы приводит к тому, что доступность канала обратно пропорциональна дальности передачи. Так, при дальности 40 км доступность в среднем за год может снизиться в два раза. Вероятность ошибки АОС ($P_{\text{ош}}$) тоже зависит от условий распространения света в атмосфере, а именно соблюдения энергетического (оптического) баланса АОС, а также скорости передачи сигналов. Происходит постоянное совершенствование технологии беспроводной оптической связи, касающееся способов обнаружения и коррекции оптической оси, подстройки мощности сигнала в передатчике, автоматической регулировки усиления в фотоприемнике. Основное направление исследований – увеличение дальности, скорости передачи информации и надежное сопровождение оптической оси канала АОС в условиях рассеивающих и поглощающих факторов атмосферы, а также турбулентности (неоднородности показателя преломления света). Современные оптические модемы оснащены специальными устройствами, позволяющими отслеживать световой луч, противостоять вибрациям опор и зданий, на крышах которых устанавливается аппаратура АОС, а также бороться с атмосферными помехами [7].

На рисунке 1.3. представлена зависимость $P_{\text{ош}}$ от видимости в условиях тумана [8].

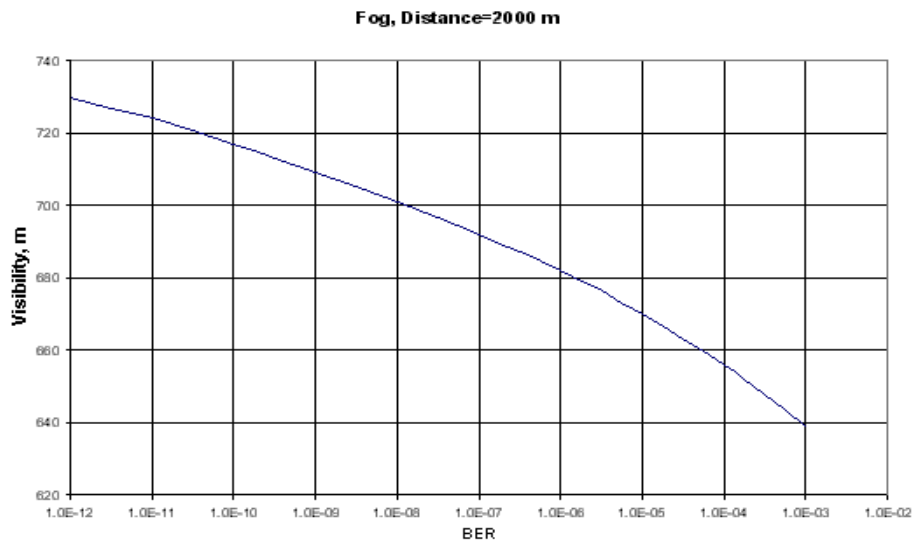


Рисунок 1.3 – Зависимость вероятности ошибки от видимости в условиях тумана [8]

Зависимость максимальной рабочей дистанции оборудования беспроводный АОС, выпущенного компанией SkyCell, от погодных условий иллюстрируется на рисунке 1.4 [8].

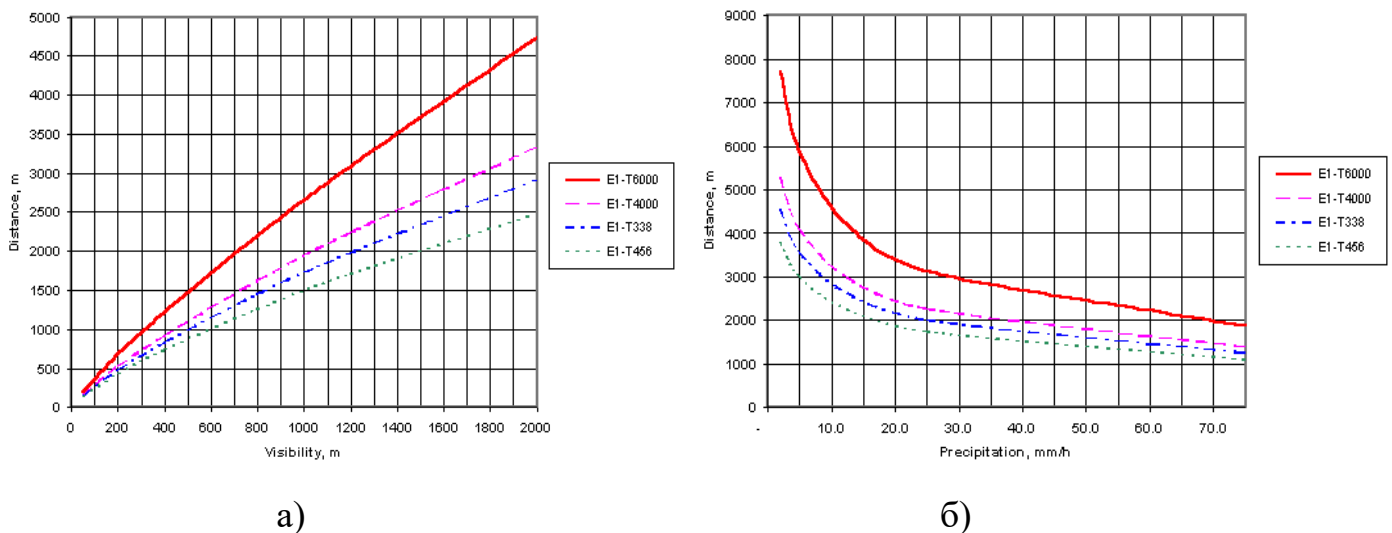


Рисунок 1.4 – Максимальные рабочие дистанции разных типов аппаратуры БОКС в зависимости от а) видимости в туман; б) интенсивности дождя [8]

Список компаний, занимающихся производством оборудования для беспроводной оптической связи приведена в таблице 1.1 [9].

Таблица 1.1 – Компании (разработчики и производители) оборудования атмосферной оптической связи

Название компании	Страна
Мостком	Россия
Оптические ТелеСистемы	Россия
Лазерные Информационные Телекоммуникации	Россия
Квантово-оптические системы	Россия
Huawei Technologies Co. Ltd.	Китай
LightPointe Communications Inc.	США
RPMC Lasers, Inc.	США
Freedom Photonics	США
Seminex	США
AIRLINX Communications, Inc.	США
SA Photonics, Inc.	США
MRV Communications Inc.	США
General Electric Co.	США
Bytelight, Inc. (AAcuity Brand's Company)	США
Fraunhofer Institute for Telecommunications	Германия
Laser 2000	Германия
Optel Optical Communication GmbH	Германия
CBL	Германия
ADVA Optical Networking SE	Германия
Avoptics	Великобритания
PAV Data Systems Ltd.	Великобритания
Wireless Excellence Ltd.	Великобритания
Canon	Япония
Panasonic Corp.	Япония
FSO Instruments	Нидерланды
Koninklijke Philips N.V.	Нидерланды
fSona Communications Corp.	Канада
Plaintree Systems Inc.	Канада
GeoDesy	Венгрия
Trimble Hungary Kft.	Венгрия
Cailabs	Франция

Продолжение таблицы 1.1

Название компании	Страна
Photonis Technologies	Франция
EC System International	Чехия
Collinear Networks, Inc.	Австралия
Indian Institute of Technology Guwahati	Индия
Redline Infrastructure (Pty) Ltd	ЮАР

Среди российских компаний, продвигающих на рынке телекоммуникаций оптическую беспроводную связь, следует отметить «Мостком» (Рязань) и «Оптические телесистемы» (Санкт-Петербург). «Мостком» проектирует и создает стационарные модемы разного типа (M1-40GE), разрабатывает различные варианты оборудования АОС для связи стационарных и подвижных объектов. «Оптические телесистемы» устанавливает оборудование разного типа АОС. К примеру, специалисты компании «Оптические телесистемы» совместно с разработчиками российской компании «Quantum Optical Systems Co Ltd» осуществили поставку и подключение модемов лазерной гигабитной связи Lantastica TZR пятого поколения в курортно-санаторном комплексе в Сочи. В настоящее время оптические беспроводные линии функционируют в Москве (для связи между учрежденческими мини-АТС), Уфе (связь в аэропорту), Находке (в сети бизнес-центров), Санкт-Петербурге (в технопарке «Полиграфмаш»), Петрозаводске (в узлах компьютерной сети Интернет-провайдера Ситилинк) и др. Основная задача FSO в этих случаях заключается в организации каналов связи на расстоянии не более 500 м по схеме «точка-точка» между зданиями, где установлены узлы коммутации, сегменты сети, бизнес-центры, рабочие офисы и др. [7].

1.3 Использование беспилотных летательных аппаратов в телекоммуникационных сетях

Для решения трудных задач мониторинга и управления в разных сферах транспорта, экономики, сельского хозяйства, техники, а также силовых служб играет значительную роль развитие технологий телекоммуникационных сетей на базе БПЛА. Создание таких сетей весьма значимо для поиска, обнаружения и идентификации различных объектов в реальном времени, определения точных координат и передачи данных на мобильные пункты управления. Сети на базе БПЛА показали большую эффективность в системах обеспечения безопасности жизнедеятельности, мониторинга окружающей среды, включая железнодорожный транспорт. Подобные сети, предназначенные для различных задач, больше всего распространены за рубежом, но и в России эта сфера быстро развивается (рисунок 1.5) [10].

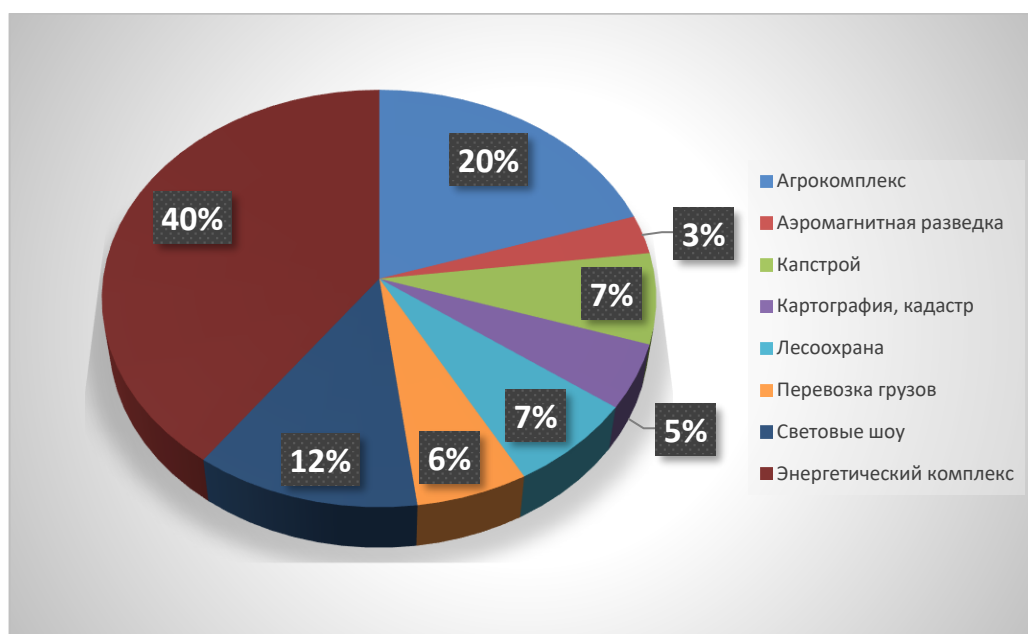


Рисунок 1.5 – Процентное соотношение применения БПЛА в сетях различного назначения России (2022 г.) [10]

В настоящее время в наиболее развитых странах мира постоянно ведутся работы по усовершенствованию функционирования сетей с БПЛА, например, для автоматизации контроля в строительной отрасли (за планированием и

проектированием работ, соблюдением техники безопасности, подготовкой различных видео- и фотоотчетов от многочисленных клиентов и т.д.). Так, очевидным примером этого является совместная разработка компаний Autodesk, 3D Robotics, Kimley-Horn в США по созданию геоинформационной системы (ГИС) с использованием БПЛА и специального программного обеспечения [11]. Такие сети имеются и в России (компания Геоскан), позволяющие автономно обследовать участки и формировать 2D и 3D модели карт местности [12]. Для ретрансляции сигналов, обследования вышек сотовой связи, в исследованиях особенностей распространения радиосигналов, в автоматизированных системах управления (АСУ) и связи используются многофункциональные комплексы с БПЛА. Перспективным способом реализации БПЛА является использование их в качестве «сетевых узлов» подключения к интернету (IoD, Internet of Drones). В мире используется более 850 различных платформ и типов БПЛА по состоянию на 2017 г. [11]. Среди таких новинок с БПЛА следует отметить привязные платформы, например, БПЛА ЕТОП израильской компании Israel Aerospace Industries. В основе лежит привязной квадрокоптер вертолетного типа размером (160x160) см с полезной нагрузкой в 20 кг, которую он может поднять на высоту 100 м вместе с оптоэлектронными системами типа mini-POP или micro-POP. На борт БПЛА с помощью гибкого кабеля подается электроэнергия, что делает продолжительность его полета практически неограниченной [10].

По оценкам J'son & Partners на 2021 год, операторы сотовой связи уже используют порядка шести тысяч мобильных базовых станций (БС) [13]. Использование БПЛА здесь выглядит как более экономически рациональное и гибкое решение (рисунок 1.6).

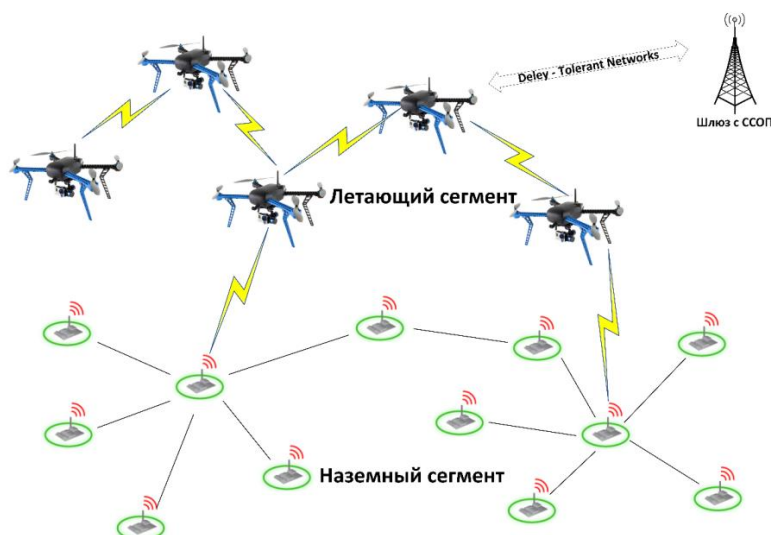


Рисунок 1.6 – Схема организации телекоммуникационной сети связи на базе БПЛА [14]

Согласно данным международных и национальных организаций, значительная часть населения как России, так и мира, по-прежнему не имеет доступа к современным каналам передачи данных, включая мобильную связь и интернет. Создание традиционной инфраструктуры систем связи часто затруднено из-за природно-климатических и географических особенностей ряда регионов, что делает развитие альтернативных решений крайне необходимым.

1.4 Особенности использования беспроводных атмосферных каналов в инфракрасном диапазоне для связи с беспилотными летательными аппаратами

Для решения задачи увеличения скорости передачи данных, предлагается использовать инфракрасный диапазон и разрабатываются новые способы организации высокоскоростной связи с подвижными объектами. Важным преимуществом АОС является защищенность от перехвата и помех, свойственных радиосвязи.

Однако у АОС есть и недостатки. При увеличении расстояния и скорости передачи данных ухудшается качество связи, вплоть до полной потери сигнала. Это связано с влиянием погоды, рассеиванием и поглощением сигнала в

атмосфере (дождь, снег, пыль и т.д.), а также с атмосферной турбулентностью (колебания температуры, давления, направления и скорости ветра) [15].

Рассеяние света – это изменение характеристик потока оптического излучения при его взаимодействии с веществом. Этими характеристиками могут быть пространственное распределение интенсивности, частотный спектр, поляризация света [16]. Часто рассеянием света называется только обусловленное пространственной неоднородностью среды изменение направления распространения света, воспринимаемое как спонтанное свечение среды. С точки зрения волновой теории, падающая световая волна возбуждает в частицах среды вынужденные колебания электрических зарядов, которые становятся источниками вторичных световых волн. При этом определяющую роль играет интерференция света между падающей и вторичными волнами [17]. Если среда рассматривается как непрерывная, то источниками рассеяния выступают оптические неоднородности среды. В этом случае среда эмпирически характеризуется изменяющимся показателем преломления. Рассеяние происходит на областях значительного изменения показателя преломления. Физически – это дифракция волны на неоднородностях.

Рэлеевское рассеяние представляет собой когерентное упругое рассеяние света на частицах, неоднородностях или других объектах, при котором длина волны света не изменяется. Такое рассеяние проявляется в условиях, когда частота света значительно ниже собственной частоты объекта или системы, на которых происходит рассеяние. Альтернативно, этот процесс можно определить, как рассеяние света на объектах, размеры которых меньше длины его волны. Этот эффект назван в честь британского физика лорда Рэля, который в 1871 году установил зависимость интенсивности рассеянного света от его длины волны [18].

Эффективное рассеяние может приводить к потерям при распространении света. Например, в одномодовом оптическом волокне рассеянный свет уходит в режимы оболочки, где теряется, что делает его недоступным для дальнейшего использования.

Турбулентность – физическое свойство атмосферы, в которой постоянно изменяются давление, температура, направление и скорость ветра. Из-за этого воздушные массы становятся неоднородными по своему составу и плотности. В результате меняется коэффициент преломления и оптический путь света. При интерференции прямого и отраженных от микрочастиц атмосферы лучей света уровень сигнала флуктуирует по амплитуде, выходя за пределы динамического диапазона (апертуру) фотоприемника (рисунок 1.7). Снижение уровня ниже порога чувствительности ФМ означает потерю сигнала, повышение выше максимально допустимого – искажение сигнала. В обоих случаях прием элементарного импульса при условии совпадения провалов и выбросов уровня с передачей информационного символа затруднен по причине возникновения ошибок [19].

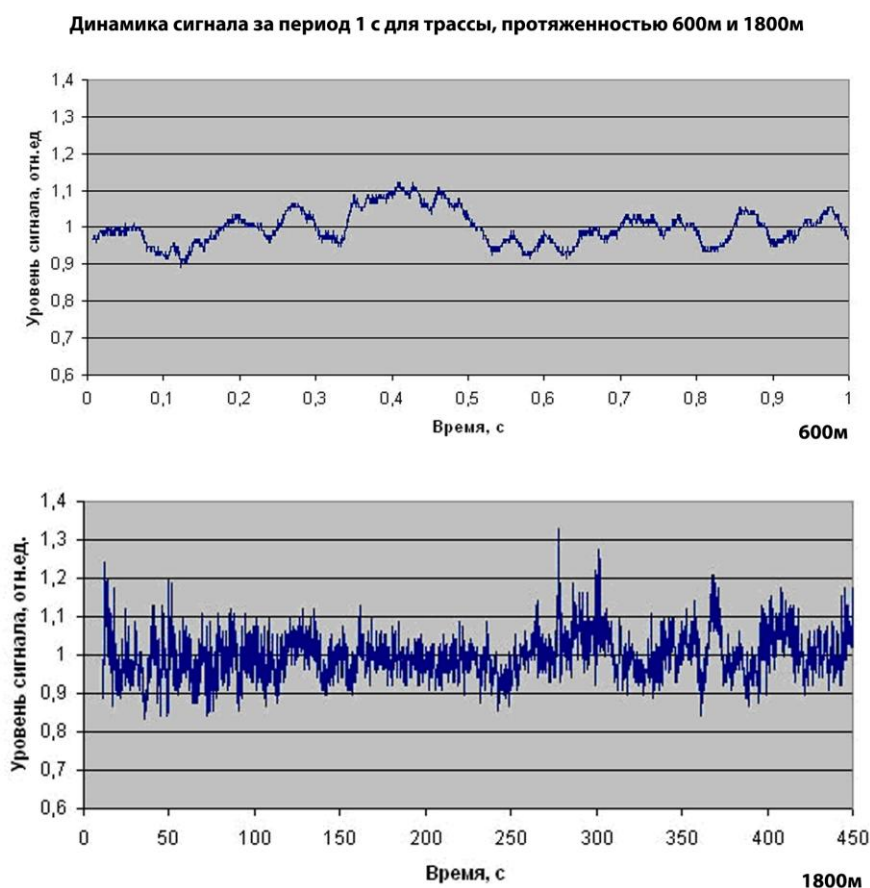
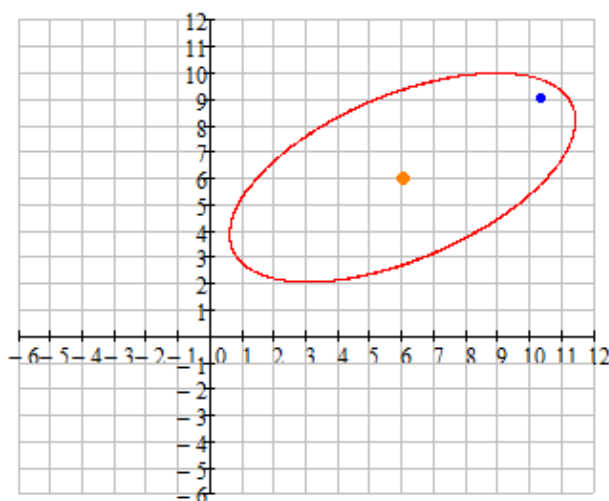


Рисунок 1.7 – Флуктуации уровня оптического сигнала под действием турбулентности для трасс разной протяженности (600 м и 1800 м) [20]

Как видно из рис. 1.7, дисперсия амплитуды сигнала в значительной степени определяется протяженностью трассы БОКС (по аналогии с эффектом «накопления» линейных помех). Чем длиннее трасса, тем больше разброс значений уровня сигнала, тем глубже провалы и выше выбросы, тем хуже качество связи. Влияют также скорость и состояние атмосферы. Чем больше скорость передачи информации, тем длительность импульса и его энергия меньше. Ухудшение погоды и увеличение скорости снижают отношение сигнал/шум и качество связи.

Поэтому на вероятность ошибки влияют атмосферные искажения (рэлеевское рассеяние и турбулентность), скорость передачи информации и протяженность трассы атмосферной связи. Так, в условиях турбулентности для атмосферного канала между стационарными объектами на расстоянии в 5 км и скоростью передачи 1,25 Гбит/с вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ имеет порядок 10^{-9} . Если дистанцию сократить до 1,8 км, то вероятность ошибки снизится до величины 10^{-11} [20].

Вероятность P_d того, что величина рассеяния проекции конуса на ФМ приемника (рис. 1.8а) позволит оценить форму, размеры и расположение эллипса, является важным показателем доступности атмосферного канала. Это указывает на то, что точки (координаты проекций лучей, рассеянных в результате турбулентности) окажутся внутри границ эллипса «рассеяния», где совместная плотность вероятностей распределена по нормальному закону [21]. В этом случае полуоси эллипса a и b (см. рис. 1.8 б) пропорциональны среднеквадратическим отклонениям σ_x и σ_y (где $k = \frac{a}{\sigma_x} = \frac{b}{\sigma_y}$).

Рисунок 1.8 – К расчету вероятности P_d

Расчет вероятности P_d относится к варианту «нисходящего» приема от БПЛА к оператору, т.е. в двумерном пространстве плоскости ФМ оператора (рис. 1.9). По формуле (1.1) рассчитывается вероятность попадания случайной точки в область эллипса рассеяния (проекции конуса) относительно центра ФМ [19]:

$$P_{da} = 1 - e^{-\left(\frac{k^2}{2}\right)} . \quad (1.1)$$

Расчет варианта «восходящего» приема, т.е. от оператора к БПЛА, требует расчетов в трехмерном пространстве (рис. 1.9), которые объясняются случайными перемещениями летательного объекта даже в условиях «зависания» в воздухе. Вероятность P_{db} попадания случайной точки (например, на проекции главной оси оптического конуса) в область, ограниченную эллипсоидом «рассеяния» с равной плотностью и полуосями $a = k\sigma_x$; $b = k\sigma_y$; $z = k\sigma_z$, определяется по формуле (1.2):

$$P_{db} = 2 \cdot \Phi(k) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot k \cdot e^{-\left(\frac{k^2}{2}\right)} , \quad (1.2)$$

где $\Phi(k)$ – табличный интеграл вероятности.

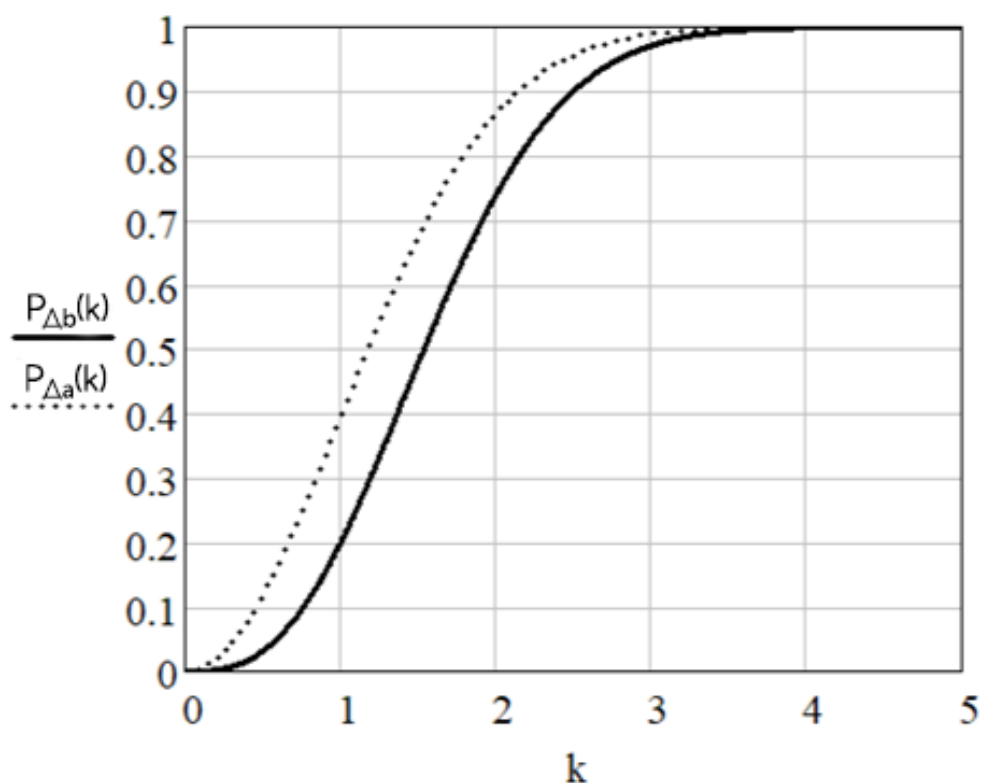


Рисунок 1.9 – Графики зависимости $P_d = f(k): P_{da}(k)$ двумерное пространство
 $P_{db}(k)$ трехмерное пространство

На графиках видно, что условия приема для «восходящей» и «нисходящей» связи различаются из-за турбулентности. Так, условия приема оптического сигнала от оператора на БПЛА при одинаковых значениях K значительно хуже. Отслеживание положения БПЛА и обеспечение связи для «восходящего» канала требует значительных усилий. Это свидетельствует о том, что формирование «восходящего» канала связи по координатам, которые получены, например, в результате оценки координат по проекции луча от «нисходящего» канала, невозможно без исследований вероятностных законов турбулентных изменений на основании статистических данных.

Коэффициент доступности K также является показателем эффективности и работоспособности атмосферного канала [22]. Он свидетельствует о способности БОКС передавать и принимать сигналы с разными скоростями, протяженностью трассы и величиной турбулентности (рис. 1.10). Эффект турбулентности имеет накопительный характер, т.е. зависит не только, например, от атмосферного

давления и силы ветра, но и дальности связи. Так, на рис. 1.10 представлены три характерных случая, имеющих место при работе БОКС. Случай А соответствует попаданию эллипса (круга) в апертуру приемника радиусом R , что означает возможность успешного приема оптического сигнала со скоростью выше $0,1 \text{ Гбит/с}$. Случай Б иллюстрирует ситуацию, когда величина турбулентности значительно затрудняет прием сигнала со скоростью до $0,1 \text{ Гбит/с}$ и делает его невозможным со скоростью выше $0,1 \text{ Гбит/с}$. Случай В показывает, что происходит со «следом», когда из-за сильной турбулентности связь прекращается при любой скорости передачи информации. Эллипс от конуса света не попадает в апертуру ФМ, рассыпается на отдельные фрагменты (разной формы и яркости). Это означает, что в условиях сильных искажений изображения эллипса требуются дополнительные операции по его восстановлению для обнаружения контуров «следа» (по аналогии с процедурой распознавания лиц).

Примеры распределения интенсивности излучения

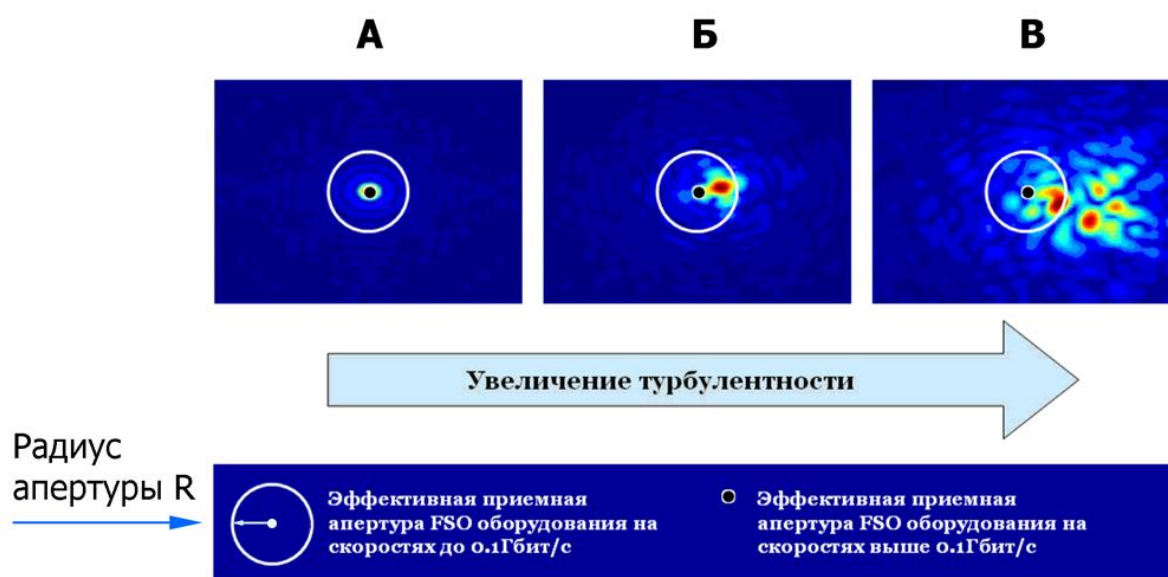


Рисунок 1.10 – Влияние турбулентности на оптический сигнал [20]

Приведенные ранее примеры (рис. 1.10) демонстрируют, что для полноценной оценки качества необходимо также вычислить коэффициент доступности канала, поскольку величину ошибки можно адекватно оценить лишь в случае, если сигнал попадает в апертуру приемника. При этом разброс сигнала

на ФМ может приобрести характер (рис. 1.10), в котором связь нарушится. Чем больше дальность и скорость передачи информации (влияние турбулентности усиливается), тем выше вероятность такого события. Как отмечено выше, с ростом скорости энергия импульса уменьшается, размытие конуса света в результате эффекта рассеяния в атмосфере увеличивается. Поэтому в условиях сильной турбулентности работоспособность БОКС следует оценивать коэффициентом доступности K . Это - вероятность того, что в апертуру приемника (рис. 1.10) в виде круга с радиусом R попадет «эллипс» от конуса света (с радиусом r).

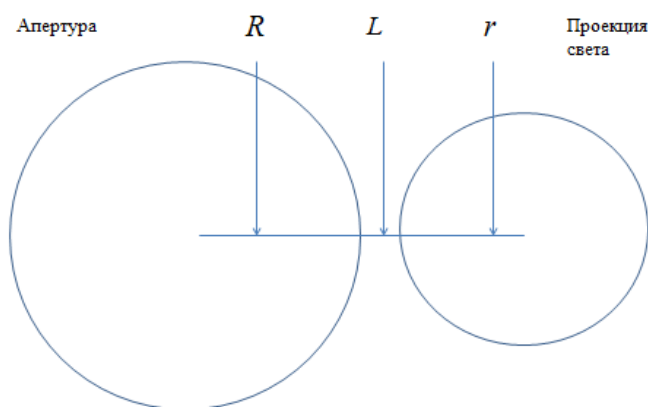


Рисунок 1.11 - К расчету коэффициента доступности канала АОС

Коэффициент доступности K можно рассчитать следующим образом:

$$K = 1 - P_{н/д} \quad , \quad (1.3)$$

где $P_{н/д}$ - вероятность того, что расстояние L между центрами апертуры и «следа» от конуса света будет равно или больше суммы $(R + r)$. Случайная величина L может флуктуировать по закону Рэлея. Поэтому вероятность $P_{н/д}$ есть результат интегрирования плотности распределения вероятностей L , а именно:

$$P_{н/д} = \int_R^{\infty} \frac{L}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{L^2}{2\sigma^2}\right) dL = \exp\left(\frac{-R^2}{2\sigma^2}\right) \quad , \quad (1.4)$$

где σ^2 – величина, характеризующая разброс оптического сигнала на ФМ в результате турбулентности.

Результаты расчета коэффициента доступности изображены на рис. 1.10 в виде графиков зависимости величины K от значения σ^2 для разных размеров апертур приемника R (скорости передачи информации).

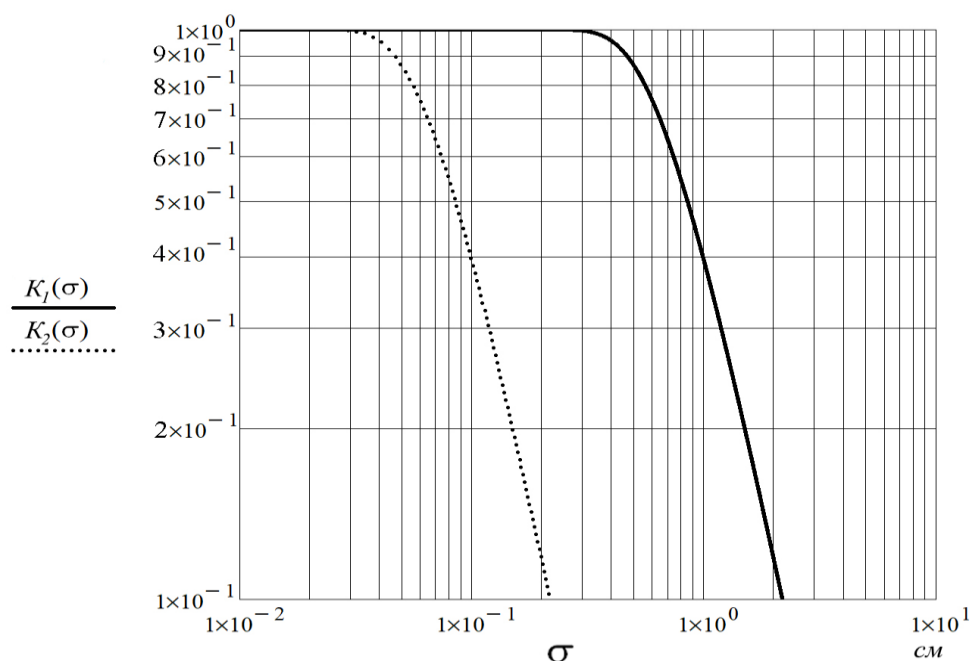


Рисунок 1.12 – Графики зависимости $K = f(\sigma)$ ($K_1, R = 1$ см; $K_2, R = 1$ мм)

Пороговый характер графиков показывает, что при конкретных значениях величины турбулентности σ (больше $\sigma = 10^{-1}$ для K_2 и $\sigma = 1$ для K_1) резко ухудшается доступность атмосферного канала. Это значит, что для таких условий в атмосфере оптическая связь становится неустойчивой или совсем прекращается. Наступление порога зависит не только от величины турбулентности σ^2 , но и скорости передачи информации. Так, величина K_1 соответствует скорости меньше $0,1$ Мбит/с, K_2 – скорости больше $0,1$ Мбит/с.

При увеличении скорости передачи информации, уменьшается радиус R апертуры, усложняются условия приема и ухудшается доступность канала K . Сравнение графиков (рис.1.11) показывает, что доступность канала тем меньше, чем выше скорость передачи сигналов (тем меньше длительность импульсов и их энергия). Повысить доступность возможно путем улучшения чувствительности ФМ за счет новых материалов оптоэлектроники. В этом случае снижаются собственные шумы ФМ и влияние атмосферных искажений («размытость»

очертаний эллипса и расстояние L). Так, за счет новых обогащенных полупроводников уменьшаются в 2 раза собственные шума ФМ (глава 4). Это равносильно такому же повышению чувствительности ФМ или снижению дисперсии рэлеевского рассеяния σ^2 . В результате доступность АОС с БПЛА может повыситься до величины $K=0,999$ (рис.1.11).

Сходную тенденцию можно заметить и в ситуации увеличения протяженности трассы канала АОС, потому что радиус «следа» r растет из-за расширения конуса света и повышаются оптические потери. Построенные графики на рис. 1.11 позволяют определить максимально возможные скорость передачи информации и дальность канала АОС для заданного коэффициента доступности и условий распространения сигнала в атмосфере (величины турбулентности σ^2). Поэтому полученные графики (рис. 1.11) позволяют выбрать оптимальные параметры канала АОС (скорость передачи информации, расстояние, условия эксплуатации), при которых возможна устойчивая беспроводная оптическая связь.

1.5 Выводы по главе

По результатам исследований, проведенных в первой главе, сделаны следующие выводы.

1. Расширение сферы применения беспроводной атмосферной оптической связи или беспроводных оптических каналов связи (БОКС) за счет использования БПЛА в качестве ретрансляторов является перспективным направлением, но требует выполнения определенных условий. Прежде всего, необходимо обеспечить высокую скорость операций захвата и сопровождения оптического сигнала, что напрямую зависит от возможности быстрой и точной оценки координат БПЛА [19]. Эта оценка может производиться по оптическому «следу» аппарата на фотоприемнике, для чего требуются научные и инженерные решения, способные распознавать этот «след» в условиях атмосферной турбулентности. Кроме того, необходим поиск наилучших оптических диапазонов (с минимальным затуханием и влиянием турбулентности) и разработка новых малоинерционных полупроводниковых материалов [23]. Решение этих задач

позволит создать системы АОС без электромеханических сервоприводов, что особенно важно для организации связи с подвижными объектами на больших территориях, а также заполярным кругом, где радиосвязь или GPS-навигация неэффективны.

2. Для разработки высокоскоростных систем захвата, сопровождения АОС необходим комплекс научных и инженерных решений, включающий:

а) создание динамически адаптирующихся приемных апертур под изменяющийся из-за турбулентности оптический «след»;

б) разработку передающих оптических систем на основе адаптивных элементов (линз, зеркал) для точного наведения лазерного луча на БПЛА;

в) создание алгоритмов распознавания оптического сигнала, искаженного турбулентностью;

г) автоматическое формирование оптических осей двухстороннего канала согласно координатам БПЛА с использованием новой элементной базы (без сервоприводов) даст возможность применения АОС для организации одноранговых сетей *MESH* на базе БПЛА.

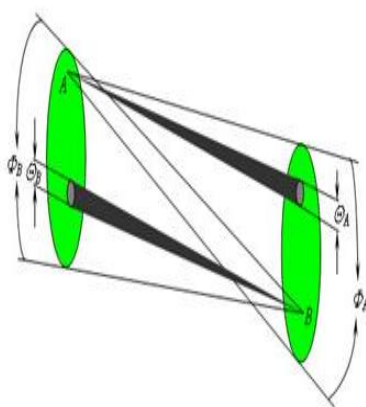
2. Доступность АОС с БПЛА дальностью свыше 1 км можно увеличить до величины $K = 0,999$ с помощью ФМ с повышенной чувствительностью за счет новых материалов оптоэлектроники, что равносильно снижению дисперсии рэлеевского рассеяния σ^2 .

3. Атмосферная оптическая связь в ИК-диапазоне используется в качестве межспутниковой связи в низкоорбитальных группировках (например, «Рассвет», «Starlink») [24].

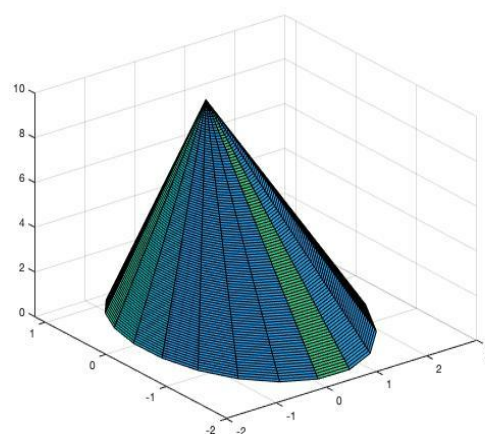
ГЛАВА 2 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

2.1 Особенности функционирования канала связи с беспилотными летательными аппаратами на базе АОС

Как было отмечено выше, преимущества атмосферной связи (АОС, АОЛС, FSO, БОКС) перевешивают недостатки. Это показывается тем, что над решением проблем АОС занимаются такие крупные в мире организации как Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (Германия), Massachusetts Institute of Technology и Georgia Institute of Technology (США), University of British Columbia (Канада), National Institute of Information and Communications Technology (Япония) и др. [20]. Главными элементами модема АОС являются модулируемый лазерный излучатель (рис. 2.1), свет от которого распространяется в виде расширяющегося конуса с углом расходимости θ , и фотоприемник, главным элементом которого является фотоматрица (ФМ) с диаметром апертуры Φ [25].



(а) Двусторонний канал БОКС



(б) конус луча на ФМ оператора

Рисунок 2.1 а, б – Атмосферный оптический двухсторонний канал связи

Кроме того, имеются системы для автоматической коррекции оптической оси, измерения уровня оптического сигнала и подстройки мощности лазера, автоматической регулировки усиления приемника [26]. Успехи в процессе совершенствования качества канала АОС позволили в последние годы приступить к реализации проектов атмосферной связи между высотными летающими объектами. Одним из самых перспективных направлений применения канал АОС является использование атмосферной связи совместно с БПЛА в качестве ретранслятора для сотовой связи, например, в местах со сложным рельефом [27]. Похожие схемы могут быть полезны также на железнодорожном транспорте для мониторинга безопасности маршрута и управления движением поездов [28]. Оптический модем оператора (дежурного), который устанавливается на крыше здания, передает сигнал на БПЛА, который затем ретранслирует его на движущийся поезд.

Решающее значение при выборе оптического диапазона канала имеют отмеченные выше преимущества канала АОС перед радиосвязью, среди которых наиболее важные – это возможность передачи высокоскоростной информации, нечувствительность к электромагнитным помехам и электромагнитная совместимость с поездной и станционной радиосвязью. Современные российские стационарные оптические модемы в условиях атмосферы обеспечивают передачу информации на длине волны $1,55\text{ мкм}$ с коэффициентом готовности 0,999 для скорости 300 Мбит/с на расстоянии не менее $3,5\text{ км}$, для 10 Гбит/с соответственно не менее 1 км [29].

Однако при ухудшении погоды всегда существует вероятность прерывания связи из-за потери лазерного луча [30]. Поэтому для реализации проектов использования оптической связи совместно с БПЛА необходимо решить задачу адаптивного сопровождения и восстановления лазерного луча от беспилотника. На эти процессы влияют не только плохая погода и турбулентность атмосферы, но и изменения положения летательного аппарата, а также вибрации от пропеллеров БПЛА. Известно, что работа БПЛА возможна только при наличии эффективного канала управления. Поэтому для повышения надежности канала

управления на основе атмосферной связи во многих источниках рекомендуется строить комбинированные сети совместно с радиосвязью [31], которые помогают процессу захвата и сопровождения оптического луча в случае сильных атмосферных возмущений.

2.2 Способ организации беспроводных оптических сетей с беспилотными летательными аппаратами с использованием спутниковой навигации

В действующих стационарных устройствах АОС установление двусторонней связи в условиях атмосферных возмущений и вибраций происходит с помощью систем автоматической подстройки оптической оси (АПОС). Исполнительным элементом в системе АПОС является сервопривод для изменения углового положения коллиматора. Коррекция луча лазера происходит после прохождения пучка света по трассе (туда и обратно) и фиксации разностного сигнала от фотодетекторов [32]. Из-за инерционности сервопривода подстройка пучка света для подвижных объектов с помощью электромеханического устройства окажется невозможным. Будут происходить постоянные срывы в канале АОС, требующие возобновления операций восстановления связи. Поэтому необходимы другие решения для организации двусторонней оптической связи между стационарным объектом и БПЛА. Для формирования обратного («восходящего») канала связи и отслеживания БПЛА возможно использовать данные, полученные от приемника, например, GPS беспилотника, а также координаты БПЛА, вычисленные с помощью анализа проекции лазерного луча на фотоматрице (ФМ) приемника оператора БПЛА (рис. 2.1 б).

Проекция конуса пучка света, формируемого лазером, на фотоматрице приемника (ФМ) представляет собой эллипс. Форма и расположение этого эллипса несут информацию о положении беспилотного летательного аппарата БПЛА в пространстве (рис. 2.2) [19].

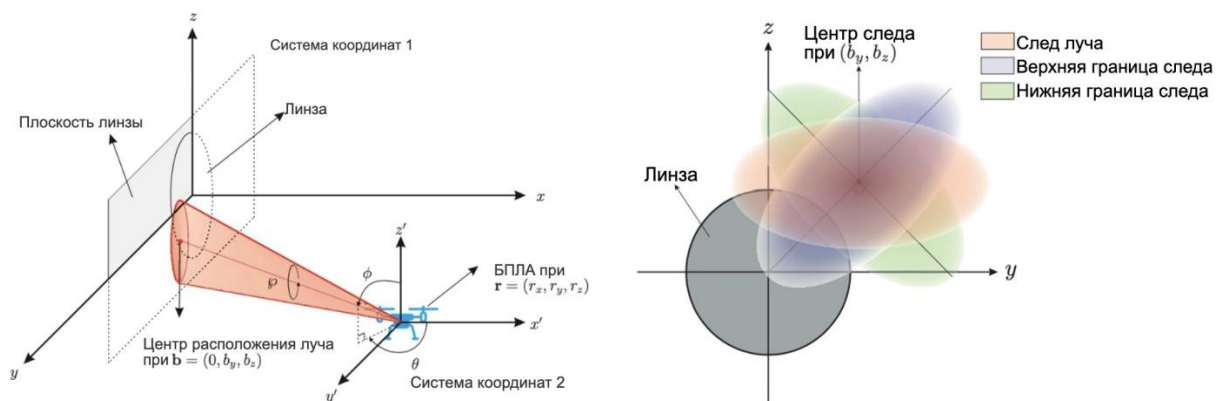


Рисунок 2.2 – Примеры изображения «следа» на ФМ приемника БОКС [33]

Анализ характеристик эллипса, таких как соотношение его диагоналей и положение на ФМ, может быть использован для оценки координат БПЛА. Эта информация, в свою очередь, необходима для реализации автоматической коррекции оптической оси и, как следствие, повышения надежности канала управления.

По яркости картинки (величине заряда на пикселях ФМ) можно определить дальность связи (расстояние до БПЛА) и угол наклона конуса (чем короче ребра конуса, тем ярче изображение). Отсюда, рассчитав по эллипсу на ФМ координаты БПЛА, можно отследить его перемещение и создать систему адаптивного слежения за лазерным лучом. Кроме того, оценка координат БПЛА позволит ограничиться только каналом управления и не использовать дополнительно спутниковую навигацию. На рис. 2.3 изображен наклонный конус от лазерного луча в сферической системе координат, а также эллипс, который связан с вершиной конуса (БПЛА) двумя наклонными треугольниками, опирающимися на диагонали [34]. После пространственного восстановления треугольников по малой и большой диагоналям эллипса определяется общая для них вершина конуса (расположение лазерного излучателя – БПЛА).

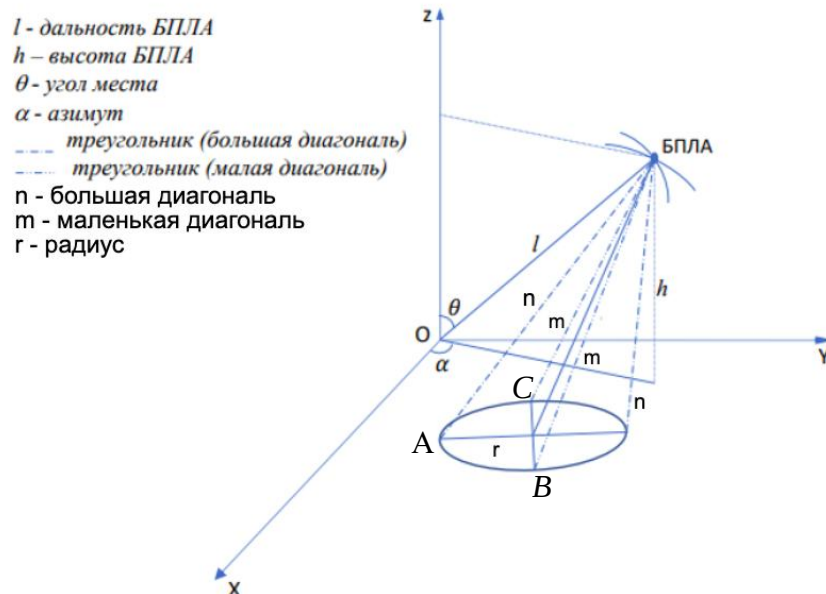


Рисунок 2.3 – Наклонный конус от лазерного луча, проецируемого на ФМ в виде эллипса в сферической системе координат

Идея использования «следа» от лазерного луча в виде эллипса на ФМ рассматривается в источниках [20] [30] [33], где основной акцент делается на аналитическом описании характеристик атмосферного канала. В этом параграфе рассматривается задача адаптивного слежения за БПЛА по информации от эллипса на ФМ (в условиях отсутствия радиосвязи). Важность решения такой задачи объясняется тем, что в существующих модемах БОКС для подстройки оптических систем используется сервопривод. Инерционность этого электромеханического устройства не позволит отследить перемещения БПЛА и «захватить» оптический сигнал в условиях турбулентности и различных вибраций [32]. Возникают постоянные перерывы связи в канале БОКС, требующие восстановления связи.

Для достижения поставленной цели в первую очередь необходима разработка: а) способа оценки координат БПЛА; б) методик расчета погрешностей от вредных воздействий турбулентности и вибраций; в) устройства формирования «восходящего» луча света и алгоритма его работы; г) рекомендаций по улучшению функционирования беспроводного оптического канала с БПЛА в условиях атмосферных потерь.

Для решения первой задачи (оценка положения БПЛА) можно решить с помощью аналитической геометрии и уравнения оптического баланса. В сферической системе координат необходимо рассчитать дальность, азимут и угол места БПЛА, которые после несложных преобразований можно перевести в декартовую систему координат x, y, z БПЛА. Предполагается, что для расчетов координат достаточно иметь следующие параметры: технические характеристики модемов АОС (значения θ, Φ , мощность лазерного излучателя, чувствительность ФМ) и условия работы атмосферного канала (оптической затухание, скорость передачи информации, сила ветра и т.д.). Исходными данными, без которых нельзя решить поставленную выше задачу, должны быть (рис. 2.3):

- 1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА и мощность оптического сигнала;
- 2) величина затухания света в атмосфере для выбранной местности и потерь в линзах приемо-передающих устройств БОКС;
- 3) размеры и ориентация эллипса в виде «следа» на ФМ приемника оператора БПЛА;
- 4) расположение и значение величины заряда на пикселях ФМ самых ярких точек на «следе» от конуса света;
- 5) реперная точка или начало координат на планшете оператора БПЛА.

На основании исходных данных и величины потерянной мощности света в процессе распространения в атмосфере рассчитываются длины ребер конуса. Для получения длины ребер конуса используется уравнение оптического баланса, учитывающего потери в атмосфере на рассеяние и поглощение, оптические потери в оптических системах модемов (линзы) (2.1):

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}} + P_{\text{ппр}} \quad , \quad (2.1)$$

где $P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}$ – энергетический баланс оптического канала (∂B_m); $P_{\text{пер}}$ – уровень мощности излучения передатчика и $P_{\text{пр}}$ – уровень мощности излучения на входе приёмника. Параметр передатчика $P_{\text{пер}}$ является исходным данным. Параметр приёмника $P_{\text{пр}}$ зависит от значения величины заряда на пикселях фотоматриц от конуса света; $P_{\text{опт}}$ – оптические потери за счет несогласованности

приемопередающих линз; $P_{\text{атм}}$ – затухание сигнала в атмосфере (потери в света на поглощение и рассеивание сигнала при распространении через атмосферу; $P_{\text{ппр}}$ – потери за счет расширения конуса света в процессе распространения, зависящие от величины угла расходимости лазерного луча γ и дальности связи.

Величина $P_{\text{опт}}$ не зависит от расстояния между оптическими модами и для большинства систем находится в диапазоне (от 1 до 2) дБм. В этом расчете выбираем $P_{\text{опт}} = 1 \text{ дБм}$ [35].

В первом приближении $P_{\text{ппр}}$ можно определить как соотношение площади пятна от луча на стороне приемника к площади линзы этого приемника, т.е. эта величина постоянная для каждой конкретной дистанции, представленной на рис. 2.4.

$$P_{\text{ппр}} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right) \text{ дБм} \quad . \quad (2.2)$$

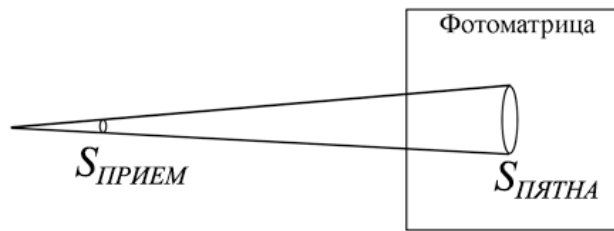


Рисунок 2.4 – Площадь пятна и площадь линзы приемника

$P_{\text{атм}} = W \cdot L$ – формула для расчёта затухания сигнала в атмосфере, где W – затухание сигнала в атмосфере (дБм/км); L – расстояние в км.

Таким образом, длины ребер L конуса (например, из точек диагоналей эллипса A , B , C) и вершиной можно вычислить с помощью системы уравнений (2.3) (приложение А):

$$\begin{cases} L_1 = (P_{\text{пер}} - P_{\text{пр1}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}})/W \\ L_2 = (P_{\text{пер}} - P_{\text{пр2}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}})/W \\ L_3 = (P_{\text{пер}} - P_{\text{пр3}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}})/W \end{cases} \quad , \quad (2.3)$$

где $P_{\text{пер}}, P_{\text{пр1,2,3}}$ – мощности оптического сигнала соответственно на выходе передатчика и фотоматрице в точках диагоналей эллипса A, B, C ; $P_{\text{ппр}} = 10 \lg \frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}}$ – оптические потери за счет расширения конуса по мере распространения пучка света; $\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}}$ – отношение площадей конуса на ФМ $S_{\text{пятна}}$ и окружности на выходе передатчика $S_{\text{прием}}$; $P_{\text{опт}}$ – потери в оптических модемах; W (дБм/км) – километрическое затухание света в атмосфере.

Способ расчета координат БПЛА (вычисления длин L ребер конуса с помощью аналитической геометрии) основывается на следующем. Ребра конуса являются сторонами пространственных треугольников (рис. 2.3), опирающихся на диагонали эллипса, с общей вершиной в точке расположения БПЛА. Путем пересечения дуг, полученных от вращения медиан треугольников (главной оси конуса), аналогично принципу спутниковой навигации, находится вершина конуса (передатчик АОС). Затем из пространственных треугольников рассчитываются длины ребер L (приложение Б). Для определения координат БПЛА (x, y, z) используется микропроцессор, который решает систему из трех уравнений с тремя неизвестными (пространственными координатами БПЛА) (2.4):

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = L_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = L_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = L_3^2 \end{cases}, \quad (2.4)$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ – измеренные координаты трех точек (пикселей) на диагоналях эллипса в точках A, B, C относительно начала координат ФМ (рис. 2.3).

С помощью координат точки БПЛА (x, y, z) определяются дальность, азимут и угол места для сферической системы координат, традиционно используемой для летательных аппаратов. Следует отметить, что координаты БПЛА могут быть определены с помощью приемника спутниковой навигации и переданы оператору.

Полученные координаты необходимы для формирования конуса света на фотоприемник беспилотника, т.е. организации двухсторонней связи и выполнения БПЛА функции ретрансляции информации от разных источников. Формирование конуса света от оператора на БПЛА возможно путем применения адаптивных линз и поворотных зеркал, при помощи которых достигается требуемый угол излучения лазера согласно координатам объекта.

Алгоритм оценки координат положения БПЛА по «следу» в виде эллипса на ФМ оператора, имеющего размеры от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (в зависимости от расстояния до БПЛА) позволит расширить сферу применения беспроводного оптического канала. Помимо каналов между стационарными объектами (крышами зданий), где традиционно применяется атмосферная оптическая связь, появится возможность организации сети совместно с БПЛА. Такие варианты можно использовать для управления движением подвижных объектов, мониторинга безопасности жизнедеятельности (пожаров, наводнений, землетрясений и т.д.) на больших территориях, ретрансляции сигналов сотовой и спутниковой связи и т.д.

Однако для реализации описанной выше идеи необходимо учитывать действие турбулентности атмосферы, в результате которой «след» в виде эллипса значительно искажается по размерам («рассыпается» по фотоматрице) и интенсивности (в идеале наиболее яркими являются участки эллипса, соответствующие более коротким лучам от конуса света).

2.3 Расчет вероятности ошибки в распознавании контура проекции конуса света на фотоматрице

Как отмечено выше, атмосферные оптические каналы целесообразны для использования в качестве физических каналов в сетях мобильной связи с БПЛА из-за дефицита частотного ресурса радиодиапазона и возрастающей потребностью в пропускной способности [36]. Однако есть существенный недостаток в виде потерь от атмосферного затухания, зависящего от погоды, и

рассеяния света, которые необходимо компенсировать, а также рэлеевские рассеяния света и турбулентность [26]. Другой особенностью беспроводной (атмосферной) оптической связи является распространение сигнала в виде светового конуса, который при перемещении БПЛА должен попасть на фотоматрицу (ФМ) фотоприемника (ФП). Таким образом, при организации двустороннего БОКС с БПЛА имеются две существенные проблемы: 1) сохранение оптического баланса; 2) удержание (захват и сопровождение) оптической оси конусов БОКС. Наиболее сложная задача – это отслеживание изменений положения оптических осей конусов двустороннего канала при перемещениях БПЛА.

Для стационарных каналов АОС с модемами, которые установлены, например, на крышах домов, для решения первой проблемы организуются дополнительные беспроводные оптические каналы обратной связи. С помощью этих каналов подстраивают конусы излучения, используя для этого электромеханические устройства (сервоприводы). Такой способ эффективен при незначительных вибрациях или колебаниях опор модемов АОС. Однако инерционность сервопривода не позволит своевременно отслеживать оптическую ось БОКС при перемещениях БПЛА, координаты которых могут меняться относительно пункта управления. Наиболее подходящим вариантом является использование оптической фазированной антенной решетки (ОФАР) [37], которая работает на основании данных о координатах БПЛА и является аналогом фазированной антенной решетки для радиоканалов. Однако для реализации этого способа оценки координат БПЛА требуются наноантенны, создание которых возможно с помощью новой элементной базы, в основе которой лежат нанотехнологии. В настоящее время наиболее простым решением определения координат БПЛА для отслеживания оптической оси БОКС является получение информации от приемника спутниковой навигации. Координаты БПЛА (например, значения x , y , z или величины азимута, угла места, высоты), переданные на стационарный пункт, могут использоваться в расчете параметров конуса света, излучаемого от лазера передатчика, для коррекции положения

оптической оси. Изменения координат при перемещении БПЛА автоматически можно отслеживать в виде проекции светового конуса на ФМ стационарного пункта. На фотоматрице приемника стационарного пункта (оператора) отображается световой «след» от наклонного конуса БОКС в виде размытого эллипса из-за рэлеевских рассеяний [38]. Эти искажения устраняются после восстановления очертаний эллипса с помощью несложных геометрических расчетов в виде сечения наклонного конуса на основании полученных координат БПЛА, известному углу расхождения конуса света и самой яркой точки на ФМ. Эта точка является вершиной большой диагонали эллипса на ФМ, определяющей «точность» положения «следа» от конуса света, и центром эллипса, координаты которого становятся известными на пункте управления благодаря координатной сетки ФМ. С помощью закона Райса, описывающего плотность распределения вероятностей яркости (величины заряда I) пикселей ФМ, можно оценить нижнюю границу вероятности ошибки $P_{ош}$ различения по яркости соседних пикселей. Величина этой ошибки характеризует точность оценки координат и сбои в отслеживании оптической оси канала и определяет коэффициент доступности канала БОКС. На вероятность ошибки влияют условия распространения света и прежде всего, рэлеевские рассеяния в атмосфере. Ошибка происходит, когда яркость соседнего пикселя I_2 будет больше, чем в точке I_1 , соответствующей вершине большой диагонали эллипса [38].

Для двух независимых нормальных случайных величин X и Y с одинаковыми дисперсиями σ^2 и ненулевыми (в общем случае неравными) математическими ожиданиями, величина $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$ имеет распределение Райса [21] [39], плотность вероятности которого описывается следующим образом (2.5):

$$\omega(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + I^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) I\left(\frac{xI}{\sigma^2}\right) \quad . \quad (2.5)$$

Вероятность ошибки можно описать в виде (2.6):

$$\int_0^{\infty} \int_H^{\infty} \omega_2(x_2) \omega_1(x_1) dx_2 dx_1 = P_{\text{ош}}(h > H) \quad , \quad (2.6)$$

где: $x_1 = I_1 + x = H$ – величина заряда пикселя (самой яркой точки на ФМ);

$x_2 = I_2 + x = h$ – величина заряда соседнего пикселя;

$\omega_1(x_1) = \frac{x_1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_1^2 + I_1^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) I\left(\frac{x_1 I_1}{\sigma^2}\right)$ – плотность распределения вероятностей случайной

величины x_1 ;

$\omega_2(x_2) = \frac{x_2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_2^2 + I_2^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) I\left(\frac{x_2 I_2}{\sigma^2}\right)$ – плотность распределения вероятностей

случайной величины x_2 ;

$I\left(\frac{xI}{\sigma^2}\right)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка [40].

Соответствующие расчеты вероятности $P_{\text{ош}}(h > H)$ для двух значений σ (рэлеевских рассеяний), представлены в виде графиков на рис. 2.5. Они показывают влияние погоды на точность определения координат оптической оси канала.

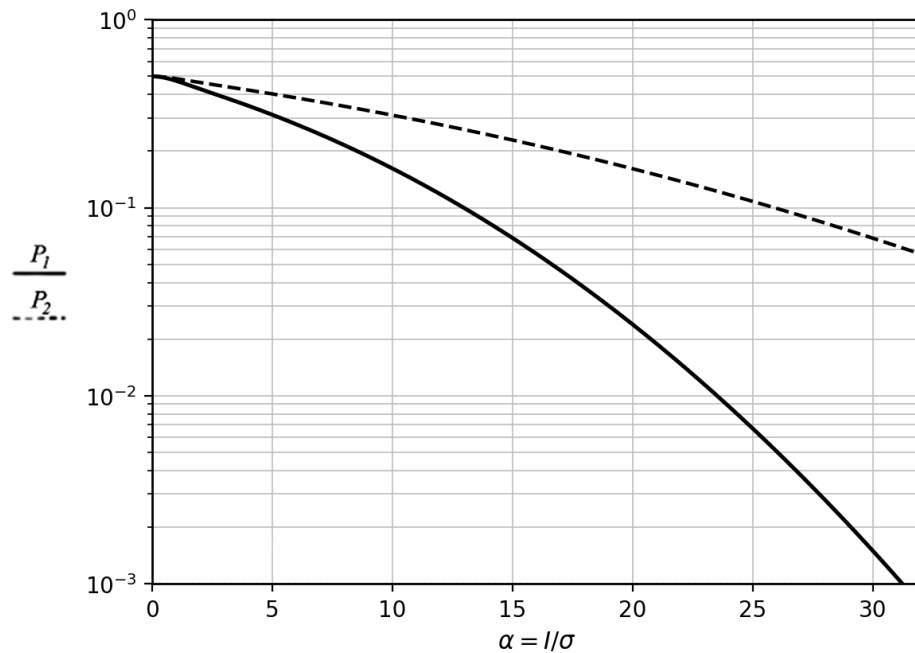


Рисунок 2.5 – Зависимость вероятности $P_{\text{ош}}(h > H)$ от отношения сигнал/шум $\alpha = \frac{I}{\sigma}$ для двух значений σ : σ_1 (сплошная), σ_2 (пунктирная) $\sigma_2 > 10\sigma_1$

Как видно из рис. 2.5, графики имеют нелинейный характер. Вероятность резко уменьшается при значениях отношения сигнал/шум $\alpha > 10$. Рабочими отношениями сигнал/шум являются те, которые обеспечивают вероятность ошибки не более 0,001. Такой эффект достигается за счет новых материалов из обогащенных полупроводников, использование которых снижает в два раза мощность собственных шумов ФМ (σ^2). В результате вероятность ошибки различения соседних пикселей уменьшится до $P_{ош} \leq 10^{-3}$.

Это связано с тем, что величина ошибки зависит не только от дисперсии шума (искажений), вызванных рэлеевским рассеянием, но и чувствительностью ФМ. Чем выше (хуже) уровень чувствительности, тем меньше разница в яркости между соседними пикселями (I_1 и I_2), зафиксированной фотоматрицей, тем больше вероятность ошибки. Поэтому выбор параметров материала ФМ и количество пикселей – это отдельная задача исследования.

Таким образом, Данные о положении оптической оси БОКС при перемещениях БПЛА позволит отслеживать оптический канал.

2.4 Система регулировки оптического баланса АОС с использованием данных спутниковой системы навигации

Для формирования направления восходящего оптического луча от лазера передатчика на стационарном пункте к БПЛА согласно расчетам по «следу» на ФМ потребуется специальная матрица и соответствующая оптика. Линзы матрицы могут быть из материала, изменяющего свои свойства (прозрачность) под действием электрического поля на основе эффекта Франца-Келдыша. Более подходящими для этих целей являются квантовые структуры [41]. Можно использовать другие варианты, например, дифракционные оптические устройства на основе пучка оптических волокон. Таким образом, после получения координат БПЛА на стационарном пункте формируется оптическая ось канала БОКС с учетом угла расхождения конуса, угла места, азимута и высоты. Такой способ отслеживания изменений положения БПЛА (без использования

электромеханических двигателей), основанный на электронике, исключит потерю связи и обеспечит требуемое качество.

Вторая проблема в использовании атмосферного оптического канала – это постоянная корректировка оптического баланса АОС из-за перемещения БПЛА и изменений затухания сигнала в атмосфере [19]. Эту проблему также можно решить с помощью информации от приемника GPS и «следа» на ФМ стационарного пункта.

Проекция наклонного конуса на ФМ имеет разную яркость из-за разности длин ребер от вершины конуса (источника сигнала) до приемника. Чем меньше расстояние, т.е. длина ребра, тем меньше потери и больше заряд пикселя. Эта информация может использоваться для расчета координат БПЛА на стационарном пункте с помощью оптического баланса [38]. Так, по координатам пикселей, соответствующих точкам вершин диагоналей эллипса на ФМ, и величине заряда этих пикселей можно рассчитать длины ребер конуса света и положение БПЛА.

Величина накопленного заряда на пикселях контура эллипса, зависит от оптического баланса Q . Известно, что оптический баланс есть разница между мощностями сигналов на выходе передатчика БПЛА и входе ФП стационарного пункта. Оптический баланс тратится на компенсацию оптических потерь: в линзах приемо-передатчика, за счет расширения конуса света при распространении сигнала (зависит от отношения площадей сечений конуса на выходе лазера и ФМ), атмосферного затухания.

Изменения величины Q могут привести к ухудшению качества связи (увеличению вероятности ошибки). Поэтому необходимо своевременно регулировать параметры передатчика (мощность лазера и глубину модуляции).

Для решения этой задачи следует рассмотреть два случая:

- 1) БПЛА перемещается, в результате изменяется расстояние до стационарного пункта, растут потери и вероятность ошибки, при превышении допустимой величины которой требуется регулировка параметров передатчиков БОКС;

2) при неизменном положении БПЛА ухудшаются условия распространения оптического сигнала (из-за погоды), что отражается в увеличении атмосферного затухания.

В обоих случаях алгоритм регулирования параметров передатчиков одинаков.

Алгоритм подстройки оптического баланса следующий. По оптическому балансу на стационарном пункте рассчитываются координаты БПЛА и сравниваются с более точными результатами расчета координат по показаниям спутниковой навигации (GPS) положения БПЛА. Ошибка в оценке координат покажет величину корректировки мощности лазера в канале в первом случае за счет изменения положения БПЛА, во втором случае за счет ухудшения погоды. Соответствующие вычисления можно осуществить с помощью устройств, функционирующих по алгоритму, представленному на рис. 2.6. Для восстановления проекции конуса света в условиях турбулентности целесообразно использовать искусственные нейросети.

В настоящее время для подстройки оптического баланса в стационарных каналах БОКС используется система регулировки мощности лазера и глубины модуляции по принятому сигналу ФП с помощью выработки специального сигнала, управляющего исполнительным элементом в цепи питания лазера. Подстройка оптической оси БОКС при смещениях положения модемов происходит с помощью дополнительного оптического канала.

Это дополнительный канал обратной связи, состоящий из двух ФП и коллимирующей оптики с автоматической компенсацией возмущений положения светового пучка сервоприводом. Рассмотренный выше вариант обеспечивает нормальную работу АОС (подстраивает оптический баланс) для стационарных объектов.

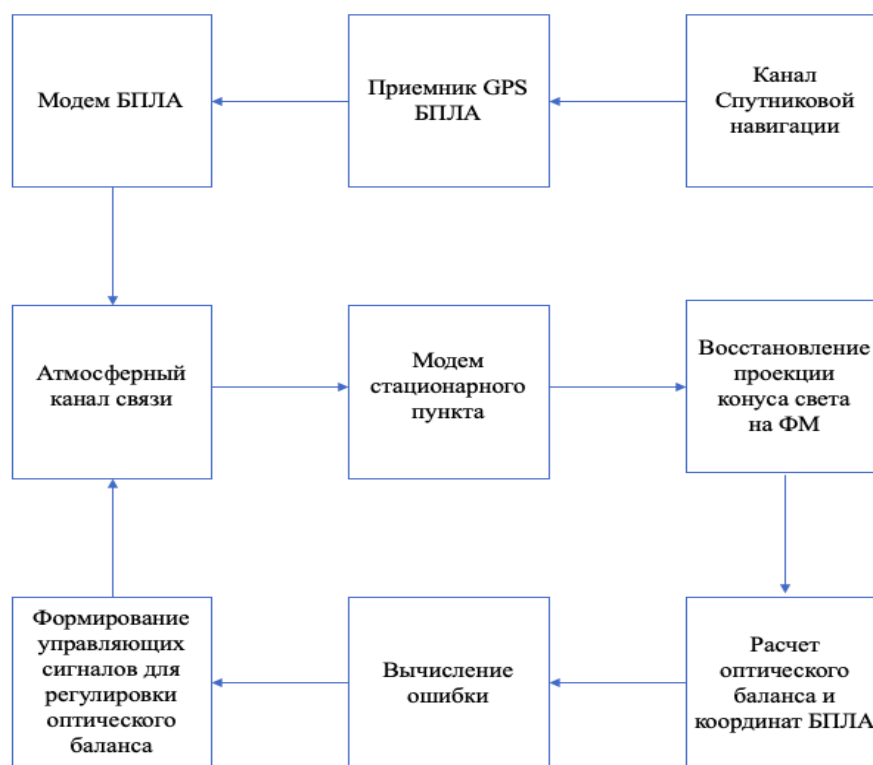


Рисунок 2.6 – Алгоритм регулировки оптического баланса АОС

Предложенный алгоритм (рис. 2.6) использует данные спутниковой навигации и результаты анализа «следа» на ФМ по оптическому балансу. Расхождение между координатами, определенными двумя указанными методами, применяется в качестве сигнала ошибки для управления параметрами оптического передатчика, например, мощностью лазерного излучения. Такой подход, реализуемый на базе современных оптоэлектронных компонентов (включая адаптивные линзы, квантово-размерные структуры, дифракционные оптические элементы), обладает существенно более высоким быстродействием по сравнению с электромеханическими системами, что способствует повышению надежности сопровождения БПЛА и стабильности канала связи.

Учитывая, что условия функционирования БПЛА отличаются от стационарного варианта, а именно, БПЛА находятся на значительно большем расстоянии от пункта управления и перемещаются в определенных пределах, предложенная схема (рис. 2.6) обеспечит более оперативную подстройку оптического баланса. Кроме того, в схеме на рис. 2.6 реализуются сразу две функции: отслеживание БПЛА (с помощью специальной оптической

фазированной антенны ОФАР) и сохранение качества связи за счет пополнения оптического баланса. Главным преимуществом приведенного алгоритма может стать надежность выполнения операций захвата и сопровождения БПЛА при перемещениях беспилотника за счет быстродействия современной оптоэлектроники.

2.5 Выводы по главе

По результатам, приведенным во второй главе, можно сделать следующие выводы:

1. Практическая реализация АОС для связи оператора с БПЛА затруднена из-за динамической неустойчивости положения беспилотника, которая требует постоянной подстройки оптических осей канала.

2. Существующие электромеханические системы автоматической подстройки оптической оси (АПОС) для стационарных объектов на основе сервоприводов обладают значительной инерционностью и непригодны для оперативного сопровождения подвижных объектов, что требует разработки альтернативных методов подстройки конусов света АОС.

3. Предложен метод оценки координат БПЛА на основе анализа геометрических и энергетических параметров проекции лазерного излучения на фотоматрице приемника, что дает возможность создания систем наведения без использования спутниковой навигации.

4. Разработан алгоритм и схема отслеживания оптических осей АОС и подстройки оптического баланса с помощью разницы в координатах, полученных: 1) от приемника спутниковой навигации; 2) вычисленных на основании уравнения оптического баланса АОС по величине накопленного заряда пикселей на ФМ в трех точках проекции конуса света.

5. Проведенный анализ вероятности ошибки различения соседних пикселей показал, что величина ошибки может уменьшиться до $P_{oui} \leq 10^{-3}$ за счет

новых материалов из обогащенных полупроводников, использование которых снижает в два раза мощность собственных шумов ФМ (σ^2).

6. Для восстановления формы проекции лазерного пучка на ФМ в условиях сильной турбулентности предложено применение алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей.

ГЛАВА 3 СИСТЕМА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ БЕЗ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

3.1 Способ организации беспроводных оптических сетей с беспилотными летательными аппаратами без спутниковой системы навигации

В данной главе рассматривается создание устойчивых и надёжных высокоскоростных каналов передачи информации с использованием БПЛА для решения сложных задач мониторинга и управления в различных сферах деятельности. Одним из наиболее перспективных направлений применения БПЛА является их использование в качестве базовых станций или ретрансляторов, способных взаимодействовать друг с другом с помощью атмосферной оптической связи (АОС).

Особое внимание уделяется необходимости разработки системы беспроводных оптических каналов связи. Такие каналы работают совместно с БПЛА и способны функционировать в условиях нестабильного положения летательных аппаратов и воздействия неблагоприятных атмосферных факторов. (рис. 3.1).

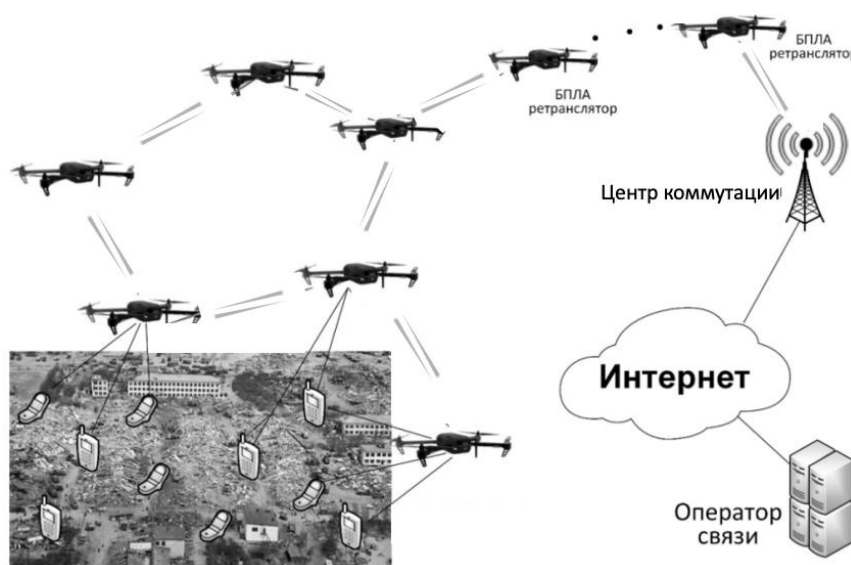


Рисунок 3.1 – Схема мобильной связи на базе БПЛА

Отслеживать перемещения БПЛА можно на основании данных от приемника спутниковой навигации беспилотника, переданных на стационарный пункт. В отсутствии приемника спутников или сигнала от спутниковой радиосвязи отслеживать оптическую ось двустороннего атмосферного канала возможно с помощью координат БПЛА, рассчитанных по проекции от конуса света на фотоматрице (ФМ) стационарного пункта (оператора). Для этого требуется восстановить контуры и диагонали эллипса, искаженные рэлеевским рассеянием, турбулентностью и другими воздействиями атмосферы с помощью компьютерного зрения (К/З) и искусственных нейросетей (ИНС). Далее на основании измеренных координат (x, y) трех точек (пикселей) на контуре (диагоналях) эллипса (рис. 3.2), полученных благодаря координатной сетки ФМ, с помощью несложных вычислений рассчитываются пространственные координаты БПЛА.

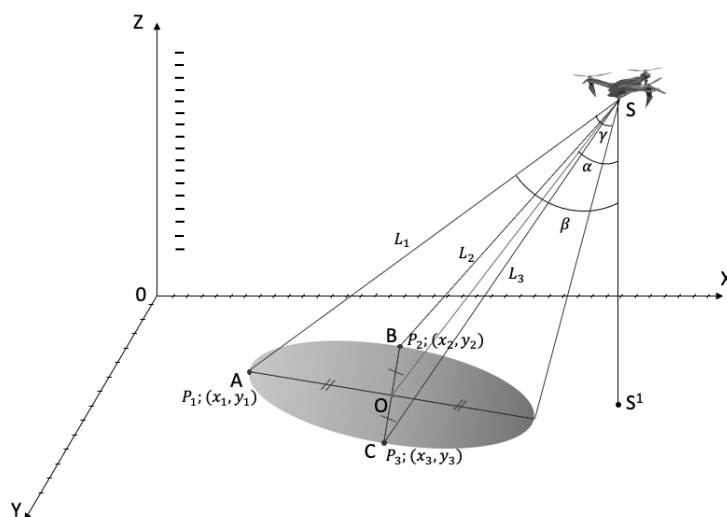


Рисунок 3.2 – Наклонный конус света от БПЛА

Если помимо координат пикселей измерить мощность сигнала в этих трех точках, то на основании уравнения оптического баланса БОКС также можно получить координаты БПЛА (при условии известных величин: углов расхождения луча и подвески модема, мощности передатчиков и первоначальной высоты БПЛА). Ошибка в значениях координат БПЛА, вычисленных геометрическим способом и с помощью оптического баланса, возможна за счет ухудшения погоды или изменения положения БПЛА. Величину ошибки предлагается использовать

для подстройки мощности лазеров и глубины модуляции в канале АОС. Координаты БПЛА нужны для формирования «восходящего» конуса света от стационарного пункта к БПЛА (решения первой задачи для создания канала управления БПЛА). Способ отслеживания оптической оси БОКС описывает один из возможных вариантов реализации оптической фазированной антенной решетки (ОФАР). Алгоритм работы ОФАР для канала управления БПЛА состоит из трех этапов: 1) обнаружение луча на ФМ оператора; 2) вычисление пространственных координат БПЛА; 3) формирование восходящего конуса света. По первым двум этапам имеются большое количество решений в иностранных и отечественных патентах, общим недостатком которых является применение элементов электромеханического сканирования, понижающих вероятность «захвата цели». Координаты БПЛА определяются с помощью информации от «следа» (точки) отраженного от объекта света на ФМ оператора. В расчетах пространственных координат БПЛА используются координаты пикселя, привязанные к координатам планшета оператора. В качестве решения для формирования восходящего канала «ОФАР» наиболее технологичным является вариант, в котором «ОФАР» реализуется на основе массива оптических волокон, работающих на эффекте электропреломления. В этом исследовании также предлагается использовать оптические волокна, но другого типа, а именно фотонно-кристаллические (ФКВ) в сочетании с жидкими кристаллами (нематитами), функционирующими на основании эффекта Фридерикса.

Для определения направления оптической оси на модем БПЛА на ФМ стационарного пункта фиксируется «след» (точка) в виде координат (x, y) с помощью с бифокального объектива и двух ПЗС-линеек. Для формирования направления оптического луча передатчика на БПЛА на стационарном пункте передающий блок стационарного устройства имеет линейку лазерных диодов, один из которых при известном угловом положении БПЛА «зажигается» с помощью электрооптического переключателя.

Для определения направления оптической оси предлагается оценивать координаты БПЛА по проекции конуса света на ФМ стационарного пункта или

оператора. На основании этих координат с помощью специальных матриц: оптической из ФКВ и управляющей из электрических проводов в виде координатной сетки, лазерного диода и оптических линз формируется пространственный угол оптической оси БОКС на фотоприемник БПЛА. Таким образом, для создания ОФАР используется эллипс на ФМ оператора, по очертаниям которого (координатам трех точек на диагоналях) согласно геометрии, рассчитываются пространственные координаты БПЛА (рис. 3.2). Параметры эллипса (площадь, расположение диагоналей относительно начала координат ФМ, эксцентриситет, эллиптичность, распределение яркости пикселей внутри контура и т.д.) дают больше информации о расположении БПЛА и позволяют прогнозировать требуемые изменения в условиях работы (высоты или мощности передатчиков). Для регулировки оптического баланса БОКС предлагается дополнительно рассчитывать координаты с помощью уравнения оптического баланса. Сравнение значений пространственных координат БПЛА, рассчитанные двумя способами, покажет величину ошибки, которая возникает за счет изменений атмосферного затухания или высоты.

В качестве метода передачи информации рассматривается использование видимого света, что означает невозможность использования существующей элементной базы, разработанной для известных «окон прозрачности» и применяемой в волоконно-оптической связи.

Теоретические вопросы проектирования оптических беспроводных каналов связи с БПЛА, освещены в работах [30] [33] [42]. В них изложены вопросы управления БПЛА с помощью беспроводных оптических каналов связи, а также имеются обоснования возможности оценки координат БПЛА с помощью проекции конуса света на ФМ стационарного пункта управления. Так, в источнике [33] представлены математические модели и аналитические исследования статистических характеристик оптического атмосферного канала с БПЛА на основании изображений эллипса на ФМ оператора при условии известных координат беспилотника. В этой главе рассматривается обратная задача: по эллипсу (проекции конуса света на ФМ) рассчитываются координаты

БПЛА. В данной главе предлагается способ расчета координат БПЛА по проекции конуса света на ФМ, а также алгоритмы компьютерного зрения и искусственные нейросети, способные восстановить разрушенный за счет турбулентности контур эллипса на ФМ.

3.2 Особенности организации беспроводного оптического канала связи между стационарным пунктом управления и беспилотным летательным аппаратом

Вариант организации канала АОС оператора с беспилотным летательным аппаратом, предложенный в работе и описанной в параграфе 3.4, можно описать следующим образом [43]. Система двустороннего беспроводного оптического канала связи с беспилотным летательным аппаратом, состоящая из оптических модемов стационарного и подвижного приемо-передающих устройств отличается от других вариантов тем, что стационарное устройство, содержащее фотоматрицу из пикселей, расположенных в виде координатной сетки, устройство обнаружения восстановления контура проекции (эллипса) светового конуса, вычислительные устройства для расчета пространственных координат БПЛА двумя способами (с помощью проективной геометрии и уравнения оптического баланса) по измеренным координатам и мощности сигналов трех точек (пикселей) контура эллипса на ФМ, углом расхождения конуса света, подвески и высоты лазерного излучателя, мощности передатчика БПЛА, а также устройство формирования направления излучения лазерного передатчика стационарного пункта согласно рассчитанным координатам БПЛА, устройство вычисления ошибки координат БПЛА разными способами, устройство формирования сигнала регулировки мощности передатчиков и глубины модуляции в канале БОКС на основании величины ошибки. Выше указанная система имеет следующие особенности:

- 1) для оценки пространственных координат БПЛА используется информация от проекции конуса света на ФМ стационарного пункта;

2) для распознавания и восстановления контура (диагоналей) эллипса используются алгоритмы компьютерного зрения и искусственных нейросетей;

3) для регулировки оптического баланса БОКС и обеспечения требуемого коэффициента доступности канала при изменениях атмосферного затухания или дальности связи используются расчетные данные пространственных координат БПЛА, вычисленные с помощью проективной геометрии и уравнения оптического баланса;

4) для формирования направления излучения передатчика стационарного модема, отслеживающего оптическую ось БОКС согласно вычисленным координатам БПЛА, используется оптоэлектронная система, состоящая из лазерного диода и расположенных в виде полусферы световодов (оптических ФКВ, заполненных в нижней части нематитами для включения режима пропускания света в соответствии с рассчитанным пространственным углом излучения лазерного передатчика), управляемых с помощью двумерной матрицы в виде координатной сетки, состоящей из плат для установки оснований волокон на пересечении горизонтальных и вертикальных шин, по которым пропускается электрический ток, изменяющий оптические свойства ФКВ.

Техническая реализация предложенной системы осуществляется с учетом особенностей распространения света в инфракрасном диапазоне в атмосфере таких как рассеяние, поглощение и турбулентность. Она также основывается на решении задач, связанных с захватом и слежением за оптической осью базового оптического комплекса (БОКС) подвижного объекта. Важным аспектом является применение элементной базы современной электроники, которая позволяет реализовывать алгоритмы компьютерного зрения и искусственные нейросети. Дополнительно учитываются конструкционные особенности передатчика стационарного пункта, назначенного для отслеживания БПЛА, а также оптоэлектронные характеристики направляющих световодов от источника излучения, выполненных из сочетания ФКВ и жидких кристаллов.

Технический результат предложенной системы достигается за счет использования современных оптических модемов БОКС, работающих в «окнах

прозрачности» атмосферы в диапазонах инфракрасного света, доказавших надежность, доступность, качество и дальность связь, необходимых для организации каналов с БПЛА. Большие достижения в области нейросетей, решающих задачи распознавания образов, позволят получить достоверную информацию о координатах БПЛА в условиях искажений конуса света турбулентностью в атмосфере.

3.3 Структура системы двусторонней оптической связи между стационарным пунктом управления и беспилотными летательными аппаратами

Как отмечалось выше, в данной главе рассматривается реализация двусторонний канал связи между стационарным пунктом управления и БПЛА, который выполняет функции ретранслятора или базовой станции мобильной связи. Такой БПЛА имеет возможность изменять своё положение в ограниченном пространстве во время функционирования сети, что позволяет адаптироваться к меняющимся условиям и обеспечивать стабильную связь. Это решение представляет собой важный шаг в развитии беспроводной связи и повышении надёжности АОС. Для организации «восходящих» и «нисходящих» каналов обмена информацией (в том числе для управления работой БПЛА) предлагается организовать в инфракрасном диапазоне широкополосную устойчивую систему связи, не подверженную электромагнитным помехам (в том числе РЭБ) и не создающую помех другим радиосредствам. Главными «узлами» такой системы связи должны быть устройства отслеживания оптических осей конусов света приемопередатчиков, опирающиеся на координаты БПЛА и формирующие направления лазерного излучения. Для этого должны быть известными следующие параметры оптических модемов, установленные в процессе инсталляции оборудования: углы расходимости и подвески лазера, первоначальная высота излучателя, а также мощность передатчика на БПЛА. На приемной стороне измеряются координаты и величина заряда пикселей (трех точек) проекции конуса света (эллипса) на ФМ стационарного пункта (рис. 3.2).

Оценка пространственных координат БПЛА позволяет сформировать оптическую ось канала АОС с помощью специальной оптоэлектронной матрицы из направляющих световодов, представляющих из себя оптические волокна (фотонно-кристаллические) и матрицы из горизонтальных и вертикальных шин в виде координатной сетки, управляемой путем включения электрического напряжения. Оценка пространственных координат БПЛА позволяет также регулировать мощность передатчиков БОКС в случае ухудшения погоды или высоты БПЛА. В данной главе рассматривается вариант ОФАР для настройки передатчика оператора (направления излучения передатчика) в виде полусферы из световодов (ФКВ), равномерно расположенных относительно друг друга, каждый из которых проводит свет от лазера (включается) в нужном пространственном угле при условии подачи электрического тока в соответствующие шины (горизонтальную и вертикальную) управляющей матрицы. При этом «открывается заглушка» из нематитов в нижней части ФКВ и волокно становится прозрачным. Этот вариант предлагается по причине отсутствия требуемой элементной базы нанoeлектроники, с помощью которой возможно было бы создать оптическую фазированную антенную решетку ОФАР по аналогии с фазированной антенной решеткой ФАР для радиосвязи. Таким образом, рассчитанный пространственный угол оптической оси (излучения лазера в сторону БПЛА) формируется с помощью полусферы из двумерных ФКВ (с первоначально полыми сердцевинами и отверстиями в оболочке, заполненными жидкими кристаллами) за счет эффекта Фридерикса. При пропускании электрического тока через соответствующие шины, на пересечении которых располагаются «заглушки» (основания ФКВ), создается необходимое электрическое поле, под действием которого меняется «прозрачность» волокна. Использование двумерного ФКВ в схеме формирования оптической оси, допускающего изгибы структуры волокна для достижения пространственного угла излучения, позволит упростить схему формирования луча в направлении БПЛА.

В работе предложен вариант «ОФАР», в основе которой лежат расчеты пространственных координат БПЛА по проекции конуса света на ФМ стационарного пункта (СП) и конструкция передатчика (рис. 3.3) из пучка световодов (фотонно-кристаллического волокна ФКВ) [43], один из которых пропускает свет от лазерного диода в направлении, соответствующем координатам БПЛА.

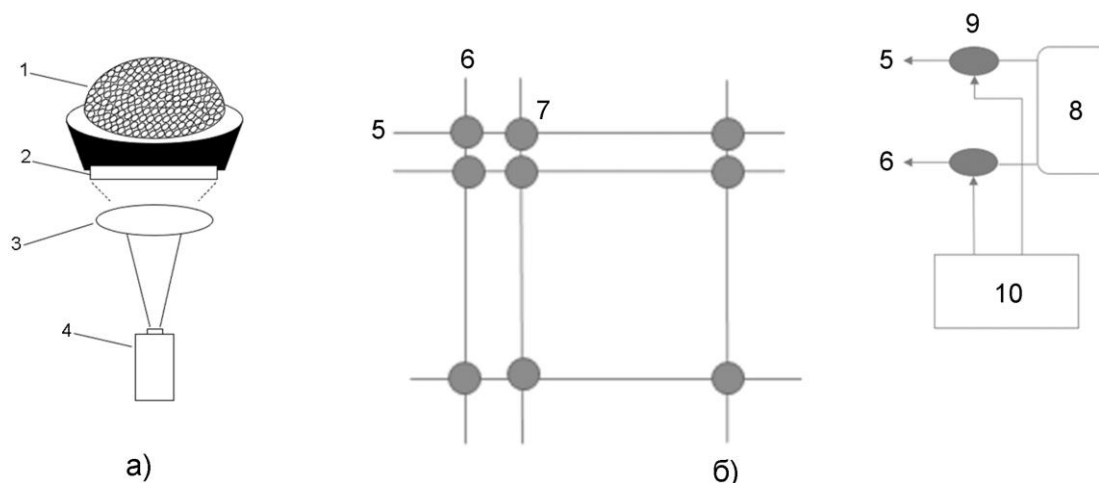


Рисунок 3.3 – а) передающий блок модема стационарного пункта
б) схема расположения проводящих горизонтальных и вертикальных шин в управляющей матрице (2)

(1 – световод; 2 – двумерная матрица; 3 – оптическая система передатчика; 4 – лазерный излучатель; 5 – горизонтальный шин; 6 – вертикальный шин; 7 – прозрачные платы; 8 – источник (питания) электрического напряжения; 9 – электронные ключи; 10 – устройства для управления сигналами)

На рис. 3.3а изображен рисунок передающего блока модема стационарного пункта, состоящего из световодов, расположенных в виде полусферы (1), управляемых с помощью двумерной матрицы (2) из электрических шин и плат для установки ФКВ, оптической системы передатчика (3) и лазерного излучателя (4). Отслеживание оптической оси осуществляется на стационарном пункте путем включения световода (на основе ФКВ с жидкими кристаллами - нематитами), проводящего свет от лазера в направлении приемника БПЛА. Выбор требуемого световода и его включение осуществляется с помощью специальной матрицы (2)

после подачи электрического тока в вертикальную и горизонтальную шину на основании рассчитанных координат БПЛА вычислительным устройством.

На рис. 3.3б изображена схема расположения проводящих горизонтальных и вертикальных шин в управляющей матрице (2), на пересечении которых расположены прозрачные платы в виде окружности (7) для установки нижней части ФКВ, заполненной нематитами для «включения» света от лазера (4). Верхняя часть ФКВ закрепляется в круглое отверстие («зрачок») полусферы (1), соответствующее вычисленному пространственному углу оптической оси БПЛА в сферической системе координат. При этом волокно подвергается изгибу по длине, что не влияет на параметры распространения света благодаря уникальным свойствам ФКВ. Подача электрического напряжения в горизонтальные (5) и вертикальные (6) шины происходит от источника (8) через электронные ключи (9) с помощью управляющих сигналов, формируемых в устройстве (10) согласно вычисленным координатам БПЛА.

Все остальные световоды (ФКВ) закрыты с помощью «заглушек» в виде оптических переключателей, представляющих из себя нижнюю часть ФКВ, заполненную жидкими кристаллами типа нематитов и расположенных на специальных платах (в точках пересечения горизонтальных и вертикальных шин управляющей матрицы в виде координатной сетки), к которым подведено электрическое напряжение. Использование ФКВ (с полыми сердцевинами и отверстиями в оболочке) в качестве направляющих каналов объясняется уникальными свойствами оптического волокна по сравнению с обычным одномодовым волокном из диоксида кремния: одномодовый режим в ФКВ спектрально не ограничен и имеется большая эффективная площадь моды для транспортировки мощного светового излучения. Жидкие кристаллы (обычно мутные) под действием электрического поля, ориентирующего молекулы кристаллов сразу во всем объеме, становятся прозрачными (эффект Фридерикса) [44] [45]. Нужный переключатель становится прозрачным в результате подключения электрического напряжения с помощью вертикальной и горизонтальной шин к плате (месту установки оптического переключателя, т.е.

В работе предложен вариант регулировки оптического баланса АОС в отсутствии спутниковой навигации.

The diagram illustrates the control system for a laser illuminator on a ground station. It consists of the following components and their interconnections:

- Система управления мощностью лазерного излучателя на СП** (Laser power control system on the ground station) is the primary control unit.
- Оптическая система передатчика на СП** (Transmitter optical system on the ground station) receives control signals from the power control system and the atmospheric channel.
- Атмосферный канал** (Atmospheric channel) facilitates bidirectional communication between the ground station and the aircraft.
- Приемо-передатчик БПЛА** (Aircraft transceiver) handles communication with the ground station.
- Оптическая система приемника стационарного пункта** (Stationary receiver optical system) receives signals from the aircraft.
- ФМ на СП** (FM on the ground station) and **К/З** (Com/Relay) are part of the communication link.
- ИНС** (Inertial navigation system) provides navigation data to the ground station's control system.
- Вычислительное устройство для расчета координат БПЛА (оптический баланс)** (Computational device for aircraft coordinates calculation - optical balance) processes data from the stationary receiver.
- Устройство вычисления ошибки в расчетах координат БПЛА** (Device for calculating coordinate calculation error) receives input from both the optical balance and the geometry-based calculator.
- Вычислительное устройство для расчета координат БПЛА (геометрия)** (Computational device for aircraft coordinates calculation - geometry) provides geometric data for error calculation.
- Вычислительное устройство для расчета сигнала регулировки мощности лазера** (Computational device for laser power adjustment signal calculation) generates control signals based on the error calculation.

Control signals flow from the **Система управления мощностью лазерного излучателя на СП** to the **Оптическая система передатчика на СП** and the **Вычислительное устройство для расчета сигнала регулировки мощности лазера**. Data from the **Атмосферный канал** and **Приемо-передатчик БПЛА** flows to the **Оптическая система приемника стационарного пункта**, which then feeds into the **ФМ на СП**, **К/З**, and **ИНС**. The **ИНС** also provides data to the **Вычислительное устройство для расчета координат БПЛА (геометрия)**. The **Оптическая система приемника стационарного пункта** also feeds into the **Вычислительное устройство для расчета координат БПЛА (оптический баланс)**. The outputs of both the optical balance and geometry calculators feed into the error calculation device, which then provides a control signal back to the ground station's power control system.

Световой сигнал в ИК диапазоне с выхода передатчика через атмосферный канал поступает сквозь оптические линзы приемника на вход фотоматрицы. Используя алгоритм компьютерного зрения, распознается проекция светового

конуса и далее восстанавливается контур эллипса с помощью искусственной нейросети. На основании первоначальной высоты БПЛА и измеренных координат (x, y) и мощности сигнала в пикселях ФМ трех точек на диагоналях эллипса производятся расчеты пространственных координат БПЛА двумя способами: согласно проективной геометрии (2.4) и на основании уравнения оптического баланса (2.3): определяются длины ребер конуса, затем составляется система уравнений для расчета пространственных координат БПЛА для каждого способа отдельно. После этого вычисляется ошибка в расчетах пространственных координат, полученных двумя способами, по ее величине формируется электрический сигнал регулировки мощности лазерных передатчиков АОС (БОКС). Сигнал регулировки подается: 1) в цепь питания лазера на стационарном пункте; 2) через оптическую систему передатчика стационарного пункта, атмосферный канал и приемник в цепь питания лазера БПЛА. Подстройка оптической оси БОКС на стационарном пункте осуществляется вычислительным устройством с помощью рассчитанных значений координат БПЛА.

Предлагаемая система управления функционирует в предположении, что координаты, рассчитанные геометрическим методом, устойчивы к флуктуациям интенсивности сигнала. Первоначальный расчёт по методу оптического баланса использует первоначальное значение удельного затухания сигнала в атмосфере W . Возникающая погрешность между двумя методами (например, из-за изменения погоды) затем используется для генерации управляющего сигнала. Данный сигнал регулирует мощность передатчика и одновременно корректирует значение W в уравнении оптического баланса до тех пор, пока результаты расчёта координат обоими методами не совпадут (не достигнут сходимости). Таким образом, формируется самокорректирующийся контур, который одновременно обеспечивает соблюдение энергетического баланса системы и даёт оценку атмосферных условий в реальном времени.

3.5 Модель компьютерного зрения и искусственной нейросети для распознавания и восстановления проекции конуса света на фотоматрице в условиях турбулентности

В условиях атмосферной турбулентности проекция лазерного конуса на фотоматрицу (ФМ) стационарного пункта управления подвергается значительным пространственно-временным искажениям [46]. Вместо четкого эллиптического контура формируется набор разрозненных, флуктуирующих по яркости и положению световых пятен. Для надежного определения пространственных координат БПЛА необходимо восстановить исходную геометрию проекции - эллипс.

Для решения данной задачи предлагается комбинированный двухэтапный подход, использующий методы компьютерного зрения (К/З) для первичной обработки и искусственную нейронную сеть (ИНС) для точного восстановления и определения параметров восстановленного эллипса.

Первоначальный этап К/З предназначен для подготовки данных и извлечения низкоуровневых признаков из сырого изображения с ФМ (рис. 3.5). Алгоритм включает следующие последовательные шаги:

- 1) обнаружение световых пятен (фрагментов);
- 2) оценка направления главной оси (градиентный анализ);
- 3) формирование проекции (восстановление очертаний).

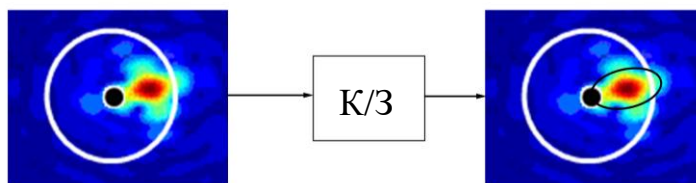


Рисунок 3.5 – Схема компьютерного зрения для распознавания проекции светового конуса на фотоматрице

Результаты работы системы компьютерного зрения, а именно восстановленный контур и начальная оценка ориентации оси, передаются на вход

искусственной нейронной сети для последующего уточнения и точного определения параметров эллипса. На втором этапе используется способность ИНС выявлять сложные, нелинейные зависимости в данных, что необходимо для компенсации турбулентных искажений, которые сложно описать аналитически.

Нейронная сеть (также искусственная нейросеть, ИНС) – математическая модель, а также программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации нервных сетей (биологических нейронных сетей) – сетей нервных клеток (нейронов) живого организм [47] [48].

Для обоснования выбора ИНС рассмотрим их классификацию по ключевым критериям. По архитектуре ИНС можно разделить на персептроны, свёрточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети и их варианты (рис. 3.6) [49].

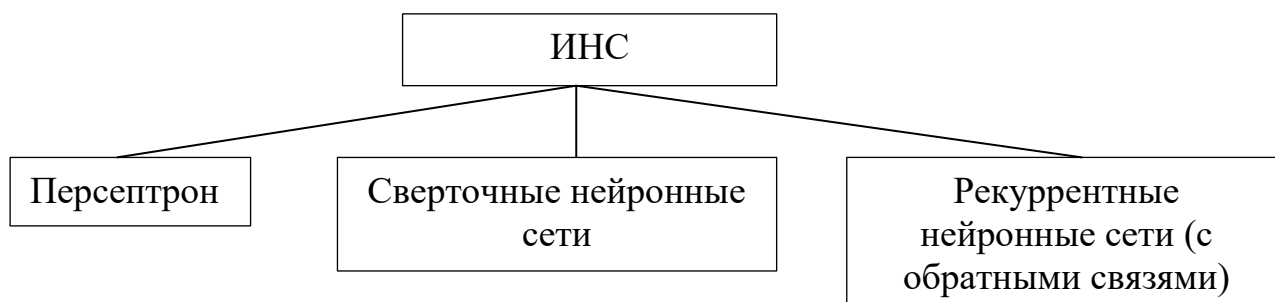


Рисунок 3.6 – Классификация ИНС по архитектуре

Персептрон (однослойные и многослойные сети прямого действия, Feed Forward Neural Networks, FNN): Сети прямого действия, где сигнал распространяется строго от входного слоя к выходному. Данные сети хорошо подходят для простой классификации и регрессии, но неэффективно справляются с данными, имеющими пространственную структуру (например, изображения). Они не могут эффективно извлекать пространственные признаки из «следа» на фотоматрице, что делает данный тип сетей малопригодным для данной задачи.

Сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN): Специализированы для обработки данных с сеточной структурой (изображений). Они используют сверточные слои для автоматического обнаружения локальных паттернов (края, текстуры, формы) [50]. CNN идеально подходят для распознавания изображений, классификации объектов, сегментация, поэтому этот тип был выбран для данной задачи.

Рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) и их варианты (LSTM, GRU): имеют обратные связи, позволяющие хранить «память» о предыдущих данных в последовательности. Их применяют для обработки временных рядов, текста, речи. Хотя турбулентность имеет временной характер, основная задача в данном разделе - восстановление формы из одного изображения с ФМ). Временная последовательность может использоваться для улучшения отслеживания, но это задача более высокого уровня, поэтому их применение в рамках текущей задачи нецелесообразно.

По типу обучения ИНС классифицируют как сети с обучением с учителем, без учителя и с подкреплением (рис. 3.7) [51].

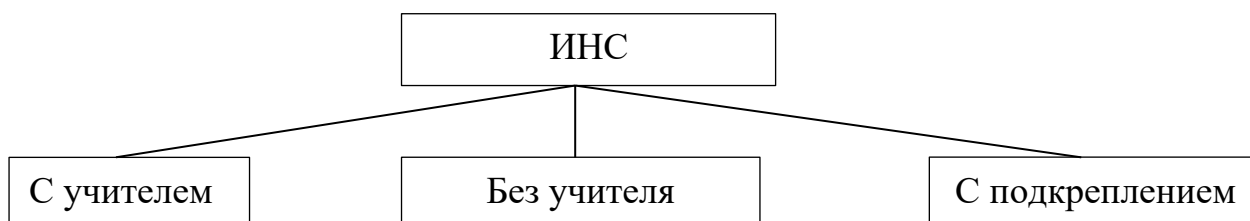


Рисунок 3.7 – Классификации ИНС по типу обучения

Обучение с учителем: Сеть обучается на размеченных данных, где каждому входному изображению соответствует целевой вектор. Обоснование выбора: у нас есть возможность генерации синтетического датасета с идеально известными параметрами эллипса и реалистичными искажениями. Это классическая задача регрессии с учителем.

Обучение без учителя: Сеть ищет скрытые структуры в данных без готовых ответов (например, кластеризация). Такие сети называют самоорганизующимися. У нас есть четкие целевые значения для обучения, что не соответствует постановке данной задачи.

Обучение с подкреплением: Агент учится, взаимодействуя со средой. Данный подход избыточен для задачи прямого прогнозирования параметров из статичного изображения и не был выбран.

Для данной задачи была выбрана свёрточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN) с каскадной (многоголовой) архитектурой для регрессии параметров эллипса, обученная с учителем.

Для решения данной задачи была разработана архитектура ИНС, входной слой которой принимает предобработанные данные в одном из двух форматов: в виде патча изображения (полное изображение, например, 64x64 пикселя), содержащего спекл-структуру вокруг кластера пятен, или в виде вектора признаков, включающего координаты и интенсивности пикселей кластера вместе с предварительно вычисленной ориентацией.

Основу работы, предложенной свёрточной нейронной сети составляют следующие математические операции [49]:

1. Свертка (Convolution): этот слой извлекает пространственные признаки из входного изображения I с помощью набора обучаемых фильтров (ядер) K . Операция свертки для элемента выходной карты признаков F на позиции (i, j) задается формулой (3.1):

$$F(i, j) = (I * K)(i, j) = \sum_m \sum_n I(i + m, j + n) \cdot K(m, n) + b, \quad (3.1)$$

где $*$ - оператор свертки, m, n – индексы ядра фильтра, b – обучаемый параметр смещения.

2. Функция активации ReLU (Rectified Linear Unit): после свертки применяется нелинейная функция активации для введения в модель нелинейности и ускорения сходимости (3.2):

$$R(i, j) = \max(0, F(i, j)) \quad (3.2)$$

3. Подвыборка (Pooling): для уменьшения пространственной размерности и количества параметров, а также для повышения инвариантности к малым сдвигам и искажениям, применяется операция подвыборки, например, максимум – пулинг (3.3):

$$P(i, j) = \max_{(m, n) \in R_{ij}} R(m, n), \quad (3.3)$$

где R_{ij} – область пулинга, соответствующая позиции (i, j) .

4. Полносвязный слой (Fully Connected Layer): после серии свёрточных и пулинговых слоев извлеченные признаки «разворачиваются» в вектор и подаются

на полносвязные слои. Каждый нейрон в таком слое соединен со всеми выходами предыдущего слоя. Его выход вычисляется как (3.4):

$$y = \phi(Wx + b) \quad , \quad (3.4)$$

где x – входной вектор, W – матрица весов, b – вектор смещений, ϕ – функция активации (например, ReLU или линейная для выходного слоя регрессии).

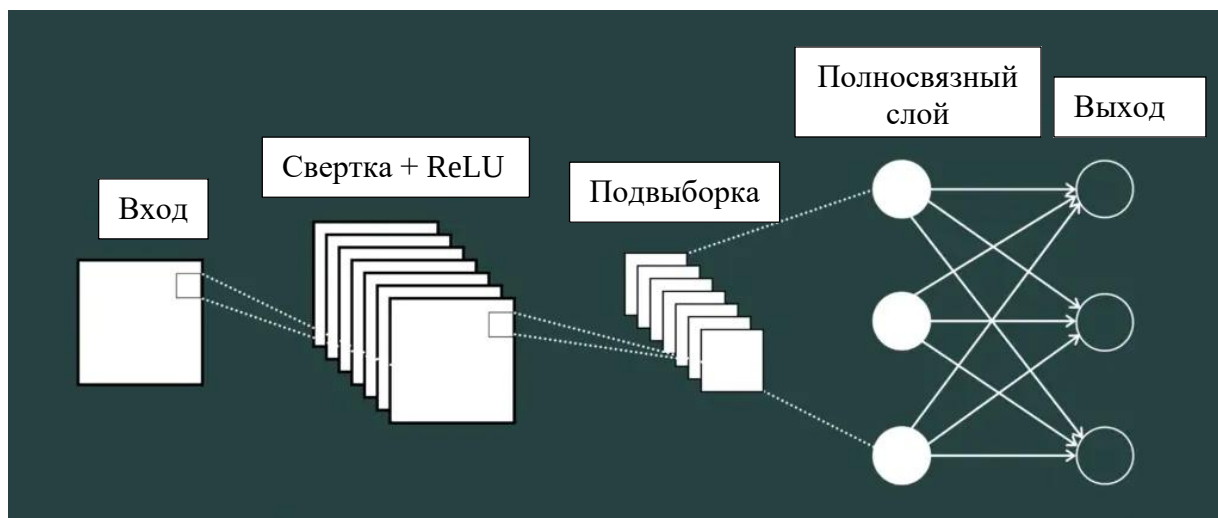


Рисунок 3.8 – Схема работы, предложенной сверточной нейронной сети [52]

При использовании изображения за слоем входа следуют свёрточные слои (Conv2D) с функциями активации (ReLU – Rectified linear unit), предназначенные для автоматического извлечения иерархических пространственных признаков из спекл-структуры. Далее следует серия полносвязных слоев (Fully connected layer/ Dense), объединяющих извлеченные признаки. Выходной слой представляет собой линейный слой с пятью нейронами, соответствующими параметрам эллипса: координатам центра, длинам большой и малой полуосей, и углу поворота большой оси относительно горизонтали.

Обучение сети проводится на синтетически сгенерированном наборе данных. Этот набор создается путем генерации изображений идеальных эллипсов с известными параметрами, последующего наложения на них моделей турбулентных искажений и добавления аддитивного гауссового шума, имитирующего шум фотоматрицы.

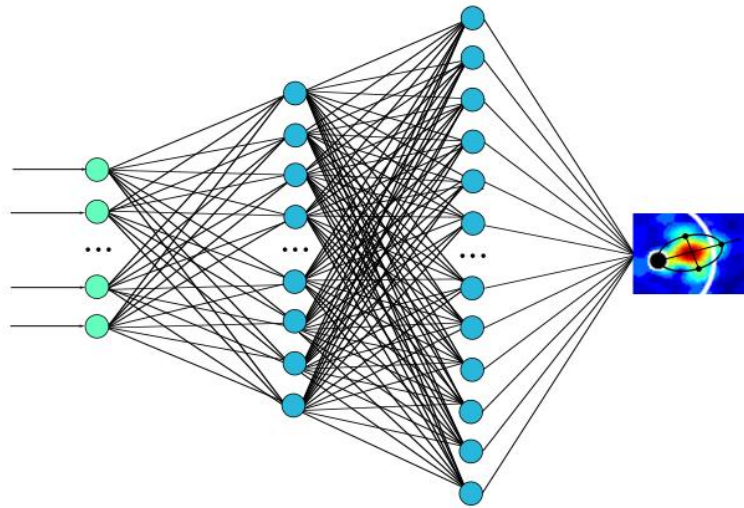


Рисунок 3.9 – Схема полносвязного слоя в предложенной нейросети

Таким образом, предложенная двухэтапная модель, сочетающая детерминированные методы компьютерного зрения для надежной предобработки и адаптивную искусственную нейронную сеть для точной регрессии параметров, позволяет эффективно решать сложную задачу восстановления эллиптической проекции в условиях сильных нелинейных искажений, вносимых атмосферной турбулентностью. Данное решение является критически важным звеном для обеспечения устойчивой работы системы двусторонней оптической связи с БПЛА в отсутствие спутниковой навигации.

3.6 Методика расчета пространственных координат беспилотного летательного аппарата

Работа системы двустороннего беспроводного оптического канала связи с беспилотным летательным аппаратом подтверждается результатами расчетов, полученных на основании формул, рассмотренных ниже и описывающих задачу расчета пространственных координат вершины конуса (БПЛА), представленного на рис. 3.2. Расчет пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи требуется для отслеживания оптической оси АОС и предотвращения срыва связи в случае изменения положения БПЛА.

Исходные данные для расчета пространственных координат БПЛА геометрическим путем (рис. 3.2):

- 1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА γ ;
- 2) углы падения луча α , β соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. 3.2);
- 3) первоначальная высота БПЛА;
- 4) координаты диагоналей эллипса на ФМ приемника стационарного пункта;
- 5) начало координат на ФМ, привязанная к координатам места.

Расчет пространственных координат БПЛА геометрическим путем (см. приложение Б):

1. Расчеты ребер конуса L_1 (SA) из прямоугольного треугольника ΔASS^1 при известном угле β .

2. Расчеты ребер конуса L_2 (SB), L_3 (SC) на основании измеренных на ФМ длин и координат диаметра эллипса из треугольников ΔOSS^1 , ΔSBC (рис. ПБ.1) по следующему алгоритму: а) с помощью прямоугольного треугольника ΔOSS^1 при известном угле α можно рассчитать длину оптической оси (гипотенузы SO); б) с применением теоремы косинусов для треугольника ΔSBC при известном угле γ можем рассчитать L_3 (SC) и L_2 (SB).

3. Расчет пространственных координат БПЛА (X , Y , Z) на основании решения системы из трех уравнений (3.5), (3.6), (3.7):

$$\begin{cases} X^2 - 2Xx_1 + x_1^2 + Y^2 - 2Yy_1 + y_1^2 + Z^2 = L_1^2 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} X^2 - 2Xx_2 + x_2^2 + Y^2 - 2Yy_2 + y_2^2 + Z^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} X^2 - 2Xx_3 + x_3^2 + Y^2 - 2Yy_3 + y_3^2 + Z^2 = L_3^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ – измеренные координаты трех точек (пикселей) на диагоналях эллипса в точках A , B , C относительно начала координат ФМ (рис. 3.2).

Для решения данной системы уравнений можно использовать различные численные методы, такие как метод Ньютона, итерационные методы или метод Гаусса-Ньютона.

Вычитая (3.5) из (3.6) получаем:

$$(2x_1 - 2x_2)X + (2y_1 - 2y_2)Y = L_2^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 \quad (3.8)$$

Вычитая (3.5) из (3.7) получаем:

$$(2x_1 - 2x_3)X + (2y_1 - 2y_3)Y = L_3^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 \quad (3.9)$$

Решая систему из двух уравнений (3.8) (3.9) относительно X , Y , получим:

$$X = \frac{(L_2^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2) \cdot (2y_1 - 2y_3) - (L_3^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2) \cdot (2y_1 - 2y_2)}{(2y_1 - 2y_3) \cdot (2x_1 - 2x_2) - (2y_1 - 2y_2) \cdot (2x_1 - 2x_3)}$$

$$Y = \frac{(L_2^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2) \cdot (2x_1 - 2x_3) - (L_3^2 - L_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2) \cdot (2x_1 - 2x_2)}{(2y_1 - 2y_2) \cdot (2x_1 - 2x_3) - (2x_1 - 2x_2) \cdot (2y_1 - 2y_3)}$$

Координата Z находится из (3.5):

$$Z = \sqrt{L_1^2 - (X - x_1)^2 - (Y - y_1)^2} = SS^1.$$

Исходные данные для расчета пространственных координат БПЛА с помощью уравнения оптического баланса АОС (рис. 3.2):

- 1) угол расхождения лазерного луча и мощность передатчика БПЛА соответственно γ , $P_{\text{пер}}$;
- 2) величина затухания сигнала в атмосфере для выбранной местности W и потерь в линзах приемо-передающих устройств АОС $P_{\text{опт}}$;
- 3) размеры и ориентация эллипса в виде «следа» на ФМ стационарного пункта (координаты и значения величин заряда пикселей ФМ трех точек ($P_{\text{пр1,2,3}}$) на диагоналях эллипса (рис. 3.2);
- 4) начало координат на ФМ стационарного пункта.

Расчет пространственных координат БПЛА на основании уравнения оптического баланса (см. приложение В):

1. Расчет составляющих (потерь) в уравнении оптического баланса с учетом мощности лазера БПЛА.
2. Расчет длин ребер на основании уравнения оптического баланса.
3. Расчет пространственных координат БПЛА с помощью системы из трех уравнений, рассмотренных выше согласно формулам (3.5) – (3.7).

В соответствии с формулой (2.1), общие энергетические потери $P_{\text{общ}}$ можно оценить по выражению (3.10):

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}} + P_{\text{ппр}} \quad \partial \text{Бм} \quad , \quad (3.10)$$

где $P_{\text{опт}}$ – потери оптического согласования в оптических системах, т.е. приемопередающих линзах (величина постоянная $\sim 1 \partial \text{Бм}$); $P_{\text{атм}}$ – затухание сигнала в атмосфере, потерь в связи с поглощением и рассеиванием сигнала при распространении через атмосферу W ($\partial \text{Бм/км}$) и расстояния L (км); $P_{\text{ппр}}$ – геометрическая потеря, обусловленных расхождением лазерного луча (см. формулу (2.1), глава 2).

Общие потери должны соответствовать оптическому балансу $Q = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}$, т.е. $Q = P_{\text{общ}}$.

Для каждой из трех точек (A, B, C) на ФМ, соответствующих ребрам L_1, L_2, L_3 составляется уравнение оптического баланса. Расстояния ребрам L_1, L_2, L_3 могут быть рассчитаны следующим образом:

$$Q'_{1,2,3} = Q_{1,2,3} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}}; L_{1,2,3} = \frac{Q'_{1,2,3}}{W} \quad . \quad (3.11)$$

На основании измеренных координат трех точек (A, B, C) на ФМ, соответствующих ребрам конуса, и вычисленным длинам L_1, L_2, L_3 (согласно оптическому балансу) путем решения системы из трех уравнений (3.5) – (3.7) рассчитываются пространственные координаты БПЛА.

По каждой пространственной координате БПЛА, вычисленной двумя способами, рассчитывается ошибка. Эта ошибка возникает за счет изменения погоды (атмосферному затуханию W) или высоты БПЛА. По вычисленной ошибке формируется сигнал регулирования мощностей лазеров в канале БОКС. Результатом подстройки оптического баланса должно стать соответствие значениям координат БПЛА, полученных геометрическим путем.

При изменении величины W пропорционально изменятся по формуле (3.11), расчетные длины ребер конуса света (согласно оптическому балансу). Так, например, если величина $W = 20 \partial \text{Бм/км}$ увеличится до $W = 22 \partial \text{Бм/км}$, то длины ребер конуса света уменьшатся также в 1,1 раза. Отсюда ошибка в расчетах

координат БПЛА (прежде всего высоты) будут иметь такой же порядок. По величине ошибки вычисляется значение подстройки мощности лазеров в канале АОС (рис. 3.4).

Пример расчетов координат по оптическому балансу и по проективной геометрии для следующих исходных данных:

Угол расхождения лазерного луча $\gamma = 0,55 \text{ мрад}$ и мощности передатчика $P_{\text{пер}} = 33 \text{ дБм}$; координаты трех точек (пикселей) на диагоналях эллипса $A (3,48728; 6,35879; 0)$; $B (8,12215; 22,09017; 0)$; $C (19,87785; 5,90983; 0)$; и измерительные мощности на входе приемника в точках A, B, C соответственно $P_{\text{пр1}} = 18,764808735 \text{ дБм}$; $P_{\text{пр2}} = 18,764821195 \text{ дБм}$; $P_{\text{пр3}} = 18,764821195 \text{ дБм}$.

Пример расчетов координат по оптическому балансу и по проективной геометрии с этих данных. Относительно начала координат на ФМ длины ребер L_1, L_2, L_3 и пространственные координаты БПЛА (x, y, z) согласно системе уравнений (3.5) – (3.7) (рис. 3.2) имеют следующие значения:

Таблица 3.1 - Длины ребер L_1, L_2, L_3 и пространственные координаты БПЛА (x, y, z)

Результаты (м)	По проективной геометрии	На основании уравнения оптического баланса
L_1	36,371943445832547357	36,37194358158998
L_2	36,36363682113267	36,36363691492287
L_3	36,36363682113267	36,36363691492287
x	18,811764567517942599	18,811861502096226316
y	13,671369432680072101	13,671439859742910699
z	27,972026926263359858	27,971927518601026382

Координаты отличается друг от друга в третьем знаке после запятой.

Полученные результаты расчетов пространственных координат БПЛА свидетельствуют о том, что данные алгоритмы расчетов позволяют реализовать

систему двустороннего оптического беспроводного канала связи с беспилотным летательным аппаратом.

3.7 Выводы по главе

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Атмосферная оптическая связь в ИК-диапазоне, реализованная в виде аппаратуры беспроводного оптического канала связи (БОКС), может быть использована для двусторонней связи между стационарными объектами и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

2. Для создания канала управления БПЛА с помощью атмосферной оптической связи необходимо решить две задачи: 1) отслеживание положения беспилотника (оптической оси канала) в определенном секторе небесной сферы; 2) регулирование оптического баланса в случае изменения погоды или координат.

3. Решить эти задачи возможно с помощью оценки положения проекции от конуса света на фотоматрице (ФМ) стационарного пункта (оператора связи).

4. Предлагается следующий алгоритм действий: 1) восстановление контура и диагоналей эллипса с помощью компьютерного зрения и искусственной нейросети; 2) расчет с помощью проективной геометрии пространственных координат БПЛА на основании измеренных координат (x, y) трех точек (пикселей) эллипса на ФМ; 3) аналогичный расчет координат БПЛА на основании уравнения оптического баланса и измеренной мощности сигнала в пикселях трех точек ФМ; 4) расчет ошибки в значениях координат БПЛА, вычисленных геометрическим способом и с помощью оптического баланса (при условии известных: углах расхождения и мощности передатчика), и использование ее для подстройки мощности лазеров; 5) формирование на основании вычисленного пространственного угла оптической оси БПЛА восходящего канала связи с помощью специальной полусферы из оптических волокон ФКВ. Изложенный выше способ организации атмосферного оптического канала описывает один из

возможных вариантов реализации оптического аналога фазированной антенной решетки.

5. Система двустороннего беспроводного оптического канала связи (БОКС) с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), характеризуется тем, что для распознавания контура эллипса она выполнена с возможностью использования алгоритмов компьютерного зрения и искусственных нейросетей.

6. Система двустороннего беспроводного оптического канала связи (БОКС) с беспилотным летательным аппаратом БПЛА, характеризуется тем, что для регулировки оптического баланса АОС и обеспечения требуемого коэффициента доступности канала при изменениях атмосферного затухания или дальности связи она выполнена с возможностью использования расчетных данных пространственных координат БПЛА, вычисления с помощью проективной геометрии и уравнения оптического баланса.

7. Система двустороннего беспроводного оптического канала связи (БОКС) с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА), характеризуется тем, что для формирования направления излучения передатчика стационарного модема, отслеживающего оптическую ось АОС согласно вычисленным координатам БПЛА, она выполнена с возможностью использования оптоэлектронной системы, состоящей из лазерного диода и расположенных в виде полусферы световодов, представляющих собой оптические фотонно-кристаллические волокна (ФКВ), заполненные в нижней части нематитами для включения режима пропускания света в соответствии с рассчитанным пространственным углом излучения лазерного передатчика, управляемых с помощью двумерной матрицы в виде координатной сетки, состоящей из плат для установки оснований волокон на пересечении горизонтальных и вертикальных шин, по которым пропускается электрический ток, изменяющий оптические свойства ФКВ.

ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

4.1 Актуальность задачи повышения качества сигналов АОС

Современные телекоммуникационные системы столкнулись с исчерпанием ресурса радиочастотного спектра, особенно в контексте управления группировками БПЛА, где требуются высокоскоростные и защищенные каналы с минимальной временной задержкой [11]. Рост объемов передаваемой информации сопровождается постоянным увеличением скорости передачи сигналов.

Широкомасштабное внедрение АОС сдерживается существенным недостатком – зависимостью от погодных условий. Такие факторы, как туман, дождь, снег и, в особенности, атмосферная турбулентность, вызывают значительное затухание и флуктуации интенсивности оптического сигнала, что приводит к нарушению энергетического баланса системы и, как следствие, к снижению дальности связи и увеличению вероятности ошибки [7]. Для парирования этих воздействий традиционно предлагается увеличивать мощность лазерного излучателя, что не всегда приемлемо для БПЛА из-за ограничений по энергопотреблению и безопасности, либо использовать системы адаптивной оптики, которые сложны, дороги и обладают ограниченным быстродействием.

Повышение качества передачи возможно, как за счет уменьшения неустраняемых помех (рэлеевское рассеяние в атмосфере, темновой шум фотоприёмника), так и за счет улучшения характеристик фотоматрицы ФС и фотодетектора ФП. Уровень шума напрямую зависит от свойств материала, в частности от коэффициента поглощения α и квантовой эффективности η . В связи с этим ключевая задача по улучшению соотношения сигнал/шум (с/ш) заключается в изучении того, как эти параметры влияют на качество передачи данных, а также разработка методов оценки повышения отношения сигнал/шум за

счет применения новых материалов. При этом научно и практически значимым представляется альтернативный путь - кардинальное улучшение характеристик приемного тракта системы.

Переход на квантовые структуры обусловлен прежде всего требованиями к повышению пропускной способности. Скорость передачи сигналов напрямую зависит от размеров элементной базы. Например, чем меньше ширина базы транзистора, тем быстрее пройдет это расстояние носитель заряда, тем круче фронт импульса, тем выше скорость передачи сигналов [53]. Кроме того, процесс очистки полупроводников от примесей, в том числе тяжелых изотопов, позволяет существенно снизить внутренний шум материала фотоматрицы и увеличить отношение сигнал/шум на входе приёмника. Данный процесс обеспечивает снижение количества дефектов кристаллической структуры, благодаря чему возрастают такие характеристики, как коэффициент поглощения, квантовая эффективность и ряд других параметров. На рис. 4.1 представлены оптоэлектронные материалы, исследованные в рамках настоящей работы.



Рисунок 4.1 – Классификация оптоэлектронных материалов [8]

Улучшение свойств материала для повышения с/ш на выходе канала связи реализуется в три последовательных шага: сначала выращиваются объёмные кристаллы из обогащённых полупроводников (микроэлектроника); затем внедряются наноструктурированные материалы (множественные квантовые ямы - МКЯ, сверхрешётки - СВР); далее - используется сочетание МКЯ/СВР и обогащённого полупроводника. Каждая стадия характеризуется приростом

основных показателей. В частности, на первом этапе применение обогащённых объёмных кристаллов приводит к увеличению коэффициента поглощения излучения α и квантовой эффективности η . На второй стадии внедрение квантово-размерных структур позволяет добиться более высокой обнаруживающей способности D по сравнению с объёмными кристаллами (при этом величина D демонстрирует прямую зависимость от числа квантовых ям $\sqrt{N}$). На третьем этапе использование изотопически обогащённых полупроводников при формировании квантовых ям обеспечивает дополнительный рост обнаруживающей способности фотоприёмников (ФП), помимо улучшения величин α и η . Наиболее перспективными сегодня материалами для ФС и ФП являются структуры на основе квантовых ям, а именно: множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешетки (СВР). Применение данных структур обеспечивает качественные преимущества фотодетекторов по сравнению с устройствами на базе традиционных объёмных полупроводниковых кристаллов.

Научной задачей данной главы является теоретическое и расчетное обоснование методов повышения качества сигналов в АОС с БПЛА за счет применения новых материалов в виде наноструктур для элементной базы фотоприёмных устройств. Известно, что использование изотопически обогащённых полупроводников и квантово-размерных структур (множественных квантовых ям, сверхрешеток) позволит существенно повысить квантовую эффективность, обнаружительную способность и снизить уровень собственных шумов ФМ [7]. Цель исследований в данной главе - показать эффект от использования новой элементной базы для АОС, который будет заключаться в увеличении оптического бюджета АОС, отношения мощностей сигнал/шум на входе ФП и повышение качества и доступности связи. Результаты научных исследований и разработок последних лет в области оптических модемов на базе наноэлектроники подтверждают эффективность такого подхода для решения задач связи с беспилотными объектами [7] [54].

4.2 Анализ оптического бюджета атмосферной оптической связи

Как отмечено выше, функционирование различных систем связи предполагает постоянный двусторонний обмен информацией между пунктом управления и подвижными объектами, такими как БПЛА. При этом использование оптического канала на инфракрасном диапазоне в системах подвижной связи рассматривается как наиболее эффективное решение.

Энергетический потенциал или оптический бюджет канала АОС является ключевым параметром, определяющим его максимальную дальность и надежность. Он описывается уравнением энергетического баланса (4.1), в котором энергетический запас системы P_3 должен покрывать суммарные потери P_n [35]:

$$P_3 = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} > P_n, \quad P_n = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}} + P_{\text{ппр}} \quad (4.1)$$

где $P_{\text{пер}}$ - уровень мощности излучения передатчика; $P_{\text{пр}}$ - уровень мощности излучения на входе приемника; $P_{\text{опт}}$ - потери оптического согласования; $P_{\text{атм}}$ - затухание сигнала в атмосфере; $P_{\text{ппр}}$ - потери в приемнике.

Потери оптического согласования $P_{\text{опт}}$ не зависят от расстояния между оптическими блоками и находятся в диапазоне $(1 - 2) \text{ дБм}$. Потери в приемнике $P_{\text{ппр}}$ и потери в атмосфере $P_{\text{атм}}$ определяются расстоянием и характером распространения светового потока. Потери в приемнике $P_{\text{ппр}}$ можно регулировать за счет оптимального выбора телесного угла и размера приемной линзы. Наибольшую неопределенность и динамический диапазон вносит слагаемое $P_{\text{атм}}$. Потери $P_{\text{атм}}$ зависят от физических характеристик атмосферы, а именно, километрического затухания W (дБм/км). Значения W лежат в широком диапазоне от $0,2 \text{ дБм/км}$ (для отличной погоды) до 350 дБм/км (для самых густых туманов) [35].

Беспроводные оптические каналы связи с достаточно большим оптическим бюджетом могут обеспечить требуемые: дальность связи (не менее 2 км); скорость передачи информации (не менее 10 Гбит/с) и коэффициент доступности (не менее $0,999$ для стационарных объектов) даже при неблагоприятных погодных

условиях. Для этого при расчете оптического бюджета необходимо обеспечить соответствующий энергетический запас, позволяющий исключить возможные риски потери связи из-за ухудшения погоды, турбулентности атмосферы, вибраций и т.д. [35] [55].

Отсюда следует, что для увеличения дальности связи беспроводного оптического канала необходимо повышать оптический бюджет.

Повысить оптический бюджет АОС возможно за счет улучшения чувствительности приемника $P_{пр}$ (снижения темнового шума) и выбора оптимальной длины волны, обеспечивающей минимальное поглощение сигнала атмосферой ($P_{атм}$). Зависимость коэффициента пропускания света от длины волны инфракрасного диапазона излучения в «окнах прозрачности» атмосферы позволяет обеспечить минимальное затухание $P_{атм}$ и выбрать оптимальные параметры аппаратуры БОКС [56].

Величина темнового тока напрямую зависит от совершенства кристаллической структуры полупроводника [57].

Таким образом, приведенный анализ показывает, что одним из наиболее эффективных путей повышения оптического бюджета является снижение уровня собственных шумов и повышение квантовой эффективности фотоприемника с помощью совершенствования элементной базы оптоэлектроники.

4.3 Перспективные материалы оптоэлектроники для высокочувствительных фотоприемников АОС

Современная оптоэлектроника переживает переход от традиционных полупроводниковых объемных кристаллов (ОК) к низкоразмерным наноструктурам, позволяющим осуществлять «инженерию зонной структуры» материала. Наиболее перспективными для создания высокочувствительных фотоприёмников инфракрасного диапазона являются гетероструктуры из множественных квантовых ям (МКЯ) и сверхрешётки (СВР) [58].

Множественные квантовые ямы (МКЯ) представляют собой структуру, в которой слой полупроводника с узкой запрещенной зоной (яма) заключен между слоями полупроводника с широкой запрещенной зоной (барьеры). Ограничение движения носителей заряда в направлении роста структуры (эффект размерного квантования) приводит к дискретизации энергетических уровней в зоне проводимости и валентной зоне. Это позволяет:

- Целенаправленно настраивать спектральную чувствительность фотоприемника, выбирая ширину ямы и высоту барьера.
- Существенно повысить квантовую эффективность η в сравнении с ОК за счет увеличения времени жизни носителей в яме и уменьшения вероятности оже-рекомбинации.
- Увеличивать обнаруживающую способность D пропорционально квадратному корню из числа ям ($D \sim \sqrt{N}$) при условии сохранения высокого качества эпитаксиальных слоев [41].

Сверхрешётки СВР– это периодическая структура с очень малым периодом (порядка 10 нм), состоящая из чередующихся ультратонких слоев двух различных полупроводников. В отличие от МКЯ в материалах на основе СВР, также состоящих из множества квантовых ям, ширина барьеров меньше или равна ширине ямы. В такой структуре происходит перекрытие волновых функций носителей заряда из соседних ям, что приводит к расщеплению дискретных уровней в мини-зоны, аналогичные зонам Бриллюэна в объемном кристалле, но с искусственно созданной шириной запрещенной зоны $\Delta E_{щ}$. Ключевые преимущества СВР:

- Возможность регистрации излучения в инфракрасном диапазоне (12-15 мкм и более), что соответствует регионам минимального поглощения в атмосфере [59].
- Искусственное создание зонной структуры с требуемыми эффективными массами носителей, что позволяет управлять транспортными и оптическими свойствами.

Следующим шагом в эволюции материалов является использование изотопически обогащенных полупроводников. Уменьшение концентрации тяжелых изотопов (операция обогащения), например, для атомов галлия снижение концентрации ^{71}Ga . Это приводит к следующим положительным эффектам [60] [61] [23]:

1. Снижается эффективная масса носителей заряда $m_{эф}$.
2. Снижается концентрация дефектов кристаллической решетки, обусловленных разницей в размерах ядер изотопов.
3. Уменьшается ширина запрещенной зоны E_g и увеличивается граничная длина волны фотоэффекта $\lambda_{гр}$.
4. Сокращается плотность фононных состояний, как следствие, уменьшается величина темнового тока и мощность тепловых шумов.

Таким образом, использование квантовых структур и операции обогащения полупроводников позволит создать фотоприёмники с высокими значениями квантовой эффективности η и обнаруживающей способности D .

4.4 Математическое моделирование оптоэлектронных характеристик нового материала на базе сверхрешёток

Для количественного прогнозирования оптоэлектронных характеристик и создания сверхрешётки (СВР) с заданными свойствами необходимо математическое моделирование зонных структур. В качестве объекта исследования рассмотрена сверхрешётка на основе твердого раствора $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}/\text{GaAs}$ с одинаковой шириной квантовой ямы a и барьера b (рис. 4.2).

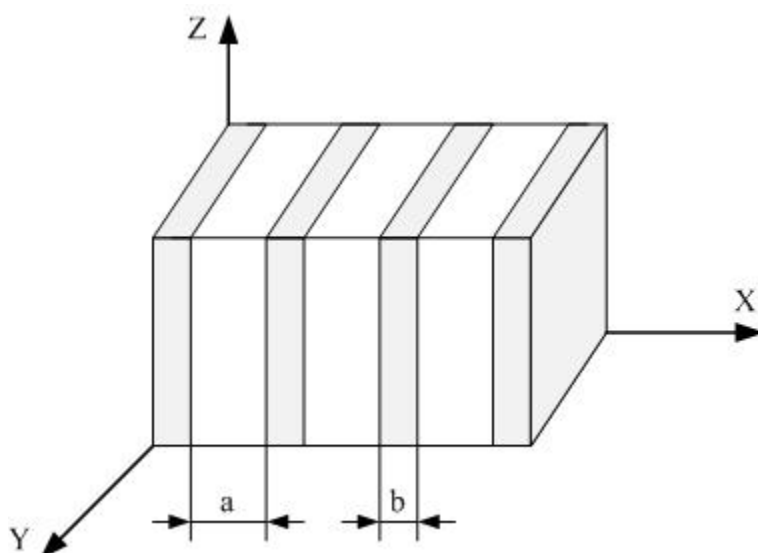


Рисунок 4.2 – Множественные квантовые ямы МКЯ (СВР $a=b$) из арсенида галлия

a – квантовая яма $GaAs$; b – барьер $Al_x Ga_{1-x} As$ [8]

Моделирование основывается на решении уравнения Шредингера, позволяющего описать поведение носителей заряда в каждом слое структуры и оценить влияние состава и размеров ямы на энергетическое распределение и ширину запрещённой зоны (щели) $\Delta E_{щ}$ [58]. Приведённое дифференциальное уравнение второго порядка (4.2) представляет собой формализованное описание волнового процесса [41]:

$$-\frac{\hbar^2 d^2 \psi(x)}{2m dx^2} + V_j \psi(x) = E \psi(x) \quad , \quad (4.2)$$

где $\psi(x)$ – волновая функция частицы; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж.с; m - масса частицы; V_j – высота потенциального барьера в j -той квантовой яме, определяемая разницей запрещённых зон материалов; E – энергия частицы.

Характеристикой j -того слоя, $1 \leq j \leq n$, является величина (4.3):

$$q_j = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (V_j - E)} \quad . \quad (4.3)$$

Решения уравнения (4.3) в разных слоях квантовой ямы представляют из себя линейные комбинации экспонент, либо синусоидальных функций. При этом решения в соседних слоях квантовых структур «сшиваются», исходя из условия

непрерывности волновой функции $\psi(x)$ и ее производной. Причем крайние слои считаются бесконечно протяженными, в которых волновая функция убывает по экспоненциальному закону. В результате получается система из четырех уравнений, которая преобразуется в дисперсионное уравнение [58] (Приложение Г).

Для создания оптоэлектронных устройств беспроводных оптических каналов в заданном диапазоне инфракрасных длин волн с использованием СВР необходимо разработать методику проектирования такого материала. В основе методики лежат исследования волновых процессов носителей заряда в многослойной наноструктуре, которой является сверхрешетка. Модель СВР отличается от модели МКЯ шириной барьеров (рис. 4.2), которая соизмерима с шириной квантовой ямы ($a = b < 6$ нм) [54]. В этом случае происходит образование узких энергетических щелей в запрещенной зоне барьеров квантовых ям, которые используются для фотоэффекта.

Для анализа волновых процессов внутри СВР с бесконечным числом слоев и периодом много большим постоянной кристаллической решетки исходного полупроводника используют модель Кронига-Пенни [41]. Согласно этой модели, носители заряда (электроны) внутри сверхрешетки с бесконечным числом слоев движутся в периодическом потенциале из строго прямоугольных ям по аналогии с моделью кристаллической решетки вещества. Такой упрощенный подход позволяет получить много интересных результатов, касающихся расщепления энергетических зон и изменения оптоэлектронных характеристик исходных полупроводников [41]. При исследовании таких материалов предполагается, что число периодов структуры стремится к бесконечности. Для сверхрешётки с одинаковым потенциальным барьером V , эффективной массой носителей $m_{эф}$ и энергией E частицы (как в области ямы шириной a , так и в области барьера) формируется система дифференциальных уравнений, определяющая вид волновых функций $\psi(x)$. С учётом эффекта туннелирования волны сквозь потенциальные барьеры соответствующая система уравнений принимает следующий вид (4.4):

для внутри ямы: $\psi(x) = Ae^{i\alpha x} + Be^{-i\alpha x}$,

для вне ямы: $\psi(x) = Ce^{qx} + De^{-qx}$, (4.4)

где $\alpha^2 = \frac{2m_{\text{эф}}E}{\hbar^2}$; $q^2 = \frac{2m_{\text{эф}}(V-E)}{\hbar^2}$.

Применяя условия непрерывности волновых функций $\psi(x)$ и их первых производных на границах раздела при $x = 0$ и $x = a$ (где a обозначает ширину квантовой ямы, а начало координат выбрано на её левой границе), после соответствующих алгебраических преобразований с учётом выражения (4.4) получаем систему уравнений (4.5):

$$A + B = C + D; i\alpha(A - B) = q(C - D). \quad (4.5)$$

Согласно теореме Блоха волновые функции в квантовых ямах могут быть связаны следующим образом [41] (4.6):

$$\psi(a) = \psi(-b)e^{ik(a+b)}, \quad (4.6)$$

где: b – ширина потенциального барьера; k – волновой вектор блоховской функции.

На основе соотношения (4.6) выражения для коэффициентов волновых функций принимают следующий вид (4.7):

$$\begin{aligned} Ae^{i\alpha a} + Be^{-i\alpha a} &= (Ce^{qx} + De^{-qb})e^{ik(a+b)}, \\ i\alpha(Ae^{i\alpha a} - Be^{-i\alpha a}) &= q(Ce^{qb} - De^{-qb})e^{ik(a+b)}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

На основании формул (4.7) получаем систему из четырёх уравнений, преобразование которой позволяет получить дисперсионное уравнение вида (4.8):

$$\frac{q^2 - \alpha^2}{2q\alpha} sh(qb) \sin(\alpha a) + ch(qb) \cos(\alpha a) = \cos kd \quad , \quad (4.8)$$

где $d = a + b$ – период СВР.

Поскольку область значений функции косинуса в правой части уравнения (4.8) ограничена интервалом $[-1; +1]$ любые значения левой части, выходящие за указанные пределы, соответствуют энергетически запрещённым зонам.

Таким образом, зависимость энергетических уровней от параметров квантовых ям представляет из себя чередование разрешенных и запрещенных зон.

На рисунке 4.3 (а, б) иллюстрируются примеры решения дисперсионного уравнения (4.8) для твёрдых растворов $GaAs$ с учётом различия эффективных

масс электронов при равенстве ширины ямы и барьера ($a = b$). Моделирование проводилось в среде Delphi (приложение Г) для двух случаев [8]: 1) СВР на основе природного $GaAs$ ($m_{эф} = 0,067m_0$, концентрация ^{71}Ga 39,9%); 2) СВР на основе обогащенного $GaAs$ ($m_{эф} \cong 0,067m_0/2$, концентрация ^{71}Ga чуть меньше 4%).

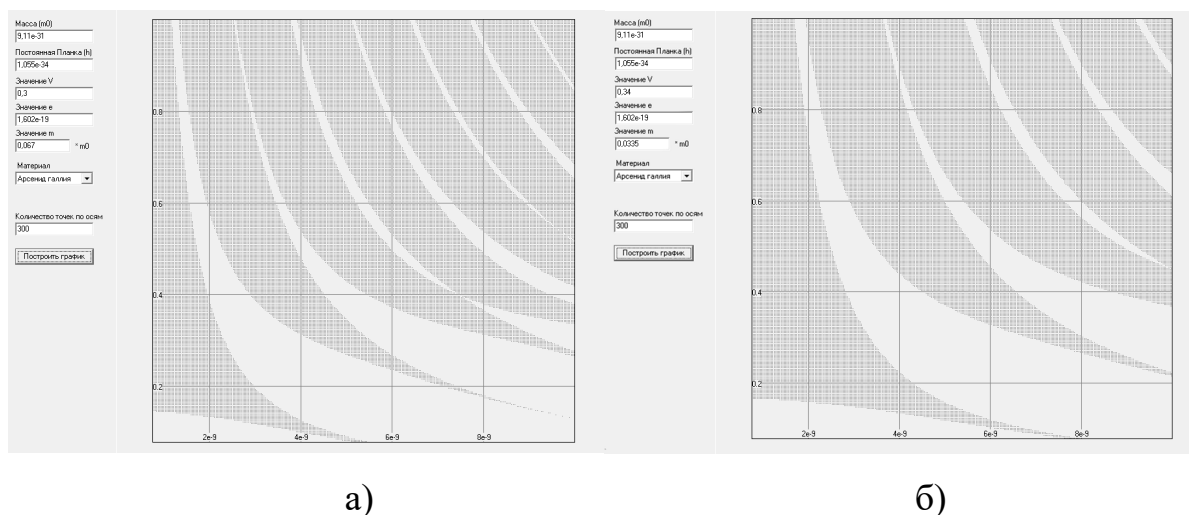


Рисунок 4.3 – Энергетические уровни СВР из арсенида галлия для $x = 0,24$:
 а – без очистки от изотопа ^{71}Ga ($m_{эф} = 0,067m_0$, $V_j = 0,3 \text{ эВ}$; б – с очисткой от ^{71}Ga ($m_{эф} \cong 0,067m_0/2$, $V_j \cong 0,34 \text{ эВ}$)

Анализ результатов моделирования показывает, что для обогащенной СВР (рис. 4.3б) по сравнению с природной (рис. 4.3а) наблюдается сужение разрешенных мини-зон и уменьшение ширины энергетических щелей $\Delta E_{щ}$. Для материалов на основе СВР можно получить требуемую ширину мини-зоны (проводимости) или энергетической щели $\Delta E_{щ}$ (аналога запрещенной зоны). По экспериментальным данным, опубликованным в [57], где представлены исследования изменений $m_{эф}$ и E_g в зависимости от количества дефектов (легирующих атомов), а также исследованиям [8], можно сделать вывод, что для полупроводники на основе арсенида галлия уменьшение концентрации тяжелого изотопа (^{71}Ga почти на порядок приводит к уменьшению эффективной массы $m_{эф}$ вдвое и повышению потенциального барьера за счет уменьшения ширины запрещенной зоны на $0,062 \text{ эВ}$ (рис. 4.3б). Это учитывается в моделировании энергетической картины СВР. В результате обогащения арсенида галлия СВР

ширина энергетических щелей уменьшается и повышается длинноволновая граница света $\lambda_{гр}$ (расширяется диапазон фотоэффекта) (рис. 4.3б).

Таким образом, использование новых материалов из обогащенных полупроводников на основе наноструктур СВР, позволяет расширить рабочий диапазон длин волн фотоприемников, снизить внутренние шумы, повысить квантовую эффективность и коэффициент поглощения, увеличить дальность связи и устойчивость к неблагоприятным внешним условиям. Последовательная модернизация элементной базы от объемных кристаллов к квантовым структурам (МКЯ, СВР) на основе обогащенных полупроводников открывает новые возможности для дальнейшего повышения эффективности и надежности беспроводных оптических каналов связи для связи с БПЛА.

4.5 Количественная оценка влияния новых материалов на качество канала АОС

Одной из ключевых характеристик фотоматрицы является квантовая эффективность η , которая зависит от коэффициента поглощения α . Квантовая эффективность характеризует способность материала преобразовывать поток фотонов в поток носителей заряда и может быть оценена по формуле (4.9) [62]:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha d}, \quad (4.9)$$

где α – коэффициент поглощения; d – толщина образца (кристалла).

При этом коэффициент поглощения определяется выражением (4.10) [41]:

$$\alpha = K_{\alpha} \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (4.10)$$

где K_{α} – коэффициент пропорциональности; $h\nu$ – энергия фотона (произведение постоянной Планка и частоты света); E_g – ширина запрещенной зоны арсенида галлия.

Исходя из графика линейной зависимости $\alpha = f(h\nu)$ [41], для арсенида галлия можно рассчитать коэффициент K_{α} на основании следующего соотношения (4.11):

$$0,8 \cdot 10^4 = K_{\alpha} \sqrt{1,5 - 1,424} \quad (1/\text{см}). \quad (4.11)$$

Следовательно, $K_\alpha = 2,902 \cdot 10^4 \left(\text{см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-\frac{1}{2}} \right)$

Так, для обогащенного материала из арсенида галлия за счет уменьшения E_g коэффициент поглощения α изменится следующим образом (4.12):

$$\alpha = 2,902 \cdot 10^4 \sqrt{1,5 - 1,364} = 1,07 \cdot 10^4 \quad (1/\text{см}). \quad (4.12)$$

Следовательно, после использования обогащенного материала из арсенида галлия повышение коэффициента поглощения α составит величину:

$$\frac{1,07 \cdot 10^4}{0,8 \cdot 10^4} = 1,338.$$

На рис. 4.4 представлена зависимость $\alpha = f(E_g)$ для арсенида галлия для энергии фотонов 1,5 эВ, соответствующей длинноволновой границе фотоэффекта [8].

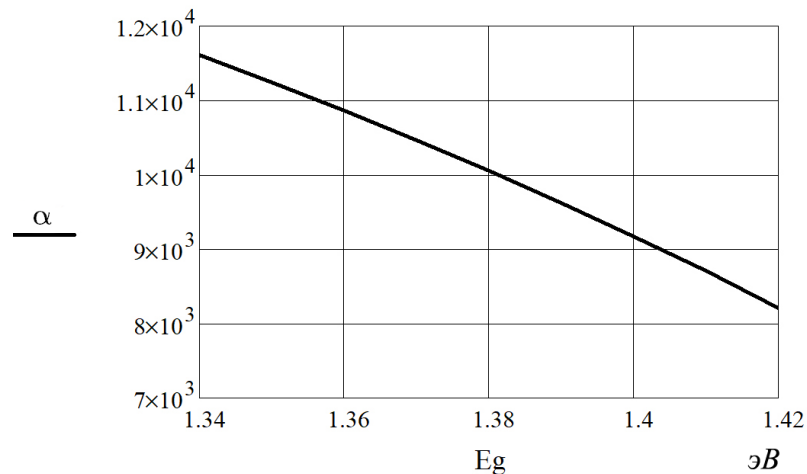


Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициента поглощения от ширины запрещенной зоны полупроводника $\alpha = f(E_g)$ [8]

Как видно из рис. 4.4, с ростом ширины запрещенной зоны коэффициент поглощения падает.

Таким образом, повышение квантовой эффективности для объемного кристалла из арсенида галлия толщиной $1\text{ м} = 10^{-4}\text{ см}$ (4.10 - 4.12) после очистки составит величину (4.13):

$$\frac{1 - e^{-1,07 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}}{1 - e^{-0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}} \cong 1,19 \quad (4.13)$$

Для квантовых ям значение размера $d = 10 \text{ нм}$ для расчета квантовой эффективности η на три порядка меньше, чем для кристаллов. Поэтому выражение (4.9) преобразуется следующим образом [8] (4.14):

$$\eta \approx \alpha_{1QW} d. \quad (4.14)$$

После изотопической очистки получим следующее увеличение квантовой эффективности для арсенида галлия в расчете на одну квантовую яму:

$$\frac{1,07 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1,338.$$

Конечным критерием эффективности применения новых материалов является улучшение характеристик всего канала связи. Ключевым параметром качества цифрового канала АОС является вероятность ошибки $P_{ош}$. Для оценки $P_{ош}$ на выходе фотоприемника ФП на фоне гауссовского (теплого) шума может быть использовано следующее соотношение [8] [62] (4.15):

$$P_{ош} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{ВЫХ}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{ВЫХ}}^2}{8}\right), \quad (4.15)$$

где $P_{ош}$ – величина вероятности ошибки; $\rho_{\text{ВЫХ}}^2$ – отношение мощностей сигнала к шуму на выходе фотоматрицы ФМ и входе решающего устройства фотоприемника.

Величину выигрыша n в улучшении качества при использовании нового материала можно определить по следующей формуле (4.16) [8]:

$$n = \frac{P_{ош}}{P_{ошоч}} = \frac{\frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{ВЫХ}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{ВЫХ}}^2}{8}\right)}{\frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{ВЫХОЧ}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{ВЫХОЧ}}^2}{8}\right)} = \sqrt{K} \cdot \exp\left((K-1) \cdot \frac{\rho_{\text{ВЫХ}}^2}{8}\right), \quad (4.16)$$

где $K = \frac{\rho_{\text{ВЫХОЧ}}^2}{\rho_{\text{ВЫХ}}^2}$ – коэффициент увеличения отношения мощностей сигнала к шуму на выходе ФМ за счет использования новых материалов из обогащенных МКЯ. Результаты расчетов $P_{ош} = f(\rho_{\text{ВЫХ}}^2)$ приведены на рис.4.5 [8].

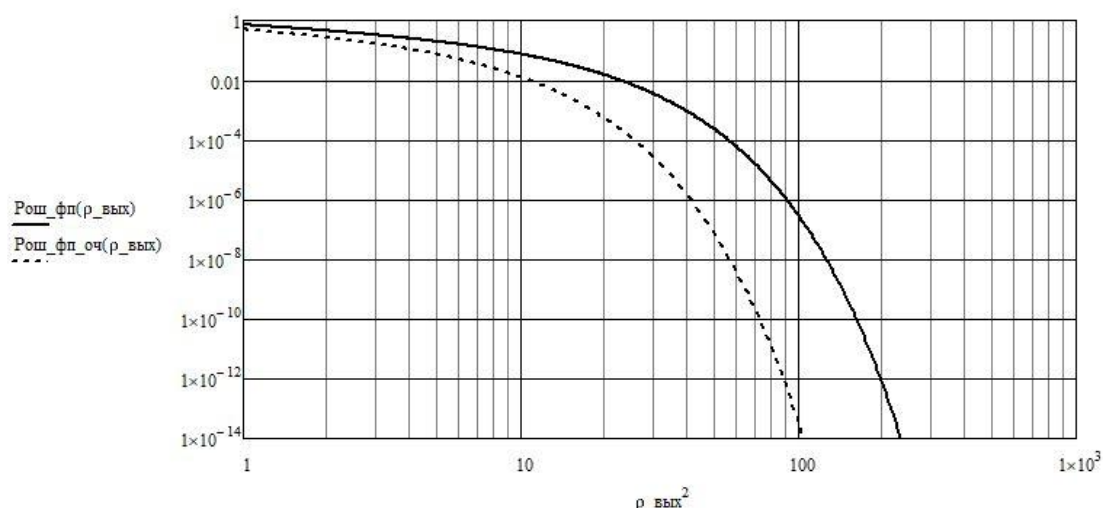


Рисунок 4.5 – Графики зависимости $P_{\text{ош}} = f(\rho_{\text{вых}}^2)$ для ФП на МКЯ из природных (сплошная линия) и обогащенных (пунктирная линия) полупроводников [8]

Результаты наглядно демонстрируют (рис. 4.5), что использование обогащенных МКЯ позволяет снизить вероятность ошибки на два порядка по сравнению с традиционными материалами, что эквивалентно увеличению энергетического бюджета системы на несколько децибел или пропорциональному увеличению дальности связи.

4.6 Выводы по главе

В результате проведенного в данной главе исследований получены следующие основные результаты:

1. На основании анализа факторов, лимитирующих оптический бюджет АОС с БПЛА установлено, что ключевым резервом повышения дальности и функциональной надежности связи является снижение уровня собственных шумов и повышение квантовой эффективности фотоприемников за счет применения новой элементной базы нанoeлектроники.
2. Математическое моделирование показало перспективность применения обогащенных квантово-размерных структур (МКЯ, СВР) для

создания высокочувствительных фотоприёмников ИК-диапазона для создания ФП с заданными характеристиками.

3. Путем математического моделирования на основе модели Кронига-Пенни для сверхрешётки $Al_{0,24}Ga_{0,76}As/GaAs$ показано, что операция обогащения полупроводниковых материалов к уменьшению эффективной массы электронов и сужению энергетических щелей СВР, что позволяет создавать новые полупроводниковые материалы для модемов сверхдлинного ИК-диапазона, перспективного (с точки зрения новых окон «прозрачности») для использования в атмосферных оптических каналах с БПЛА.

4. Перевод оптических модемов на элементную базу нанoeлектроники с использованием обогащенных полупроводников и квантовых структур приводит к существенному повышению отношения сигнал/шум и снижению вероятности ошибки на два порядка. Это позволяет повысить эффективность АОС, а именно: дальность, функциональную надежность и качество беспроводных оптических систем связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного диссертационного исследования, посвященного разработке и исследованию системы связи с беспилотными объектами на основе атмосферных оптических каналов, получены следующие основные выводы:

1. Разработаны и обоснованы научные методы организации связи с БПЛА на основе атмосферных оптических каналов АОС инфракрасного диапазона. Показано, что такая система позволяет преодолеть дефицит радиочастотного спектра, обеспечить высокую пропускную способность, электромагнитную совместимость, защищенность от радиопомех, и может быть применена в транспортной инфраструктуре, для мониторинга безопасности, в телекоммуникациях и других областях хозяйственной деятельности.

2. Разработана система связи с БПЛА на основе АОС, в которой решены главные задачи: подстройка оптических осей двухстороннего канала с подвижным объектом и регулировка оптического баланса в условиях атмосферных помех (ухудшения погоды и турбулентности).

3. Предложен вариант организации связи оператора и БПЛА с использованием спутниковой навигации (ГНСС) для определения координат БПЛА на стационарном пункте управления, а также разработаны:

а) структурная схема двухстороннего канала АОС с БПЛА, позволяющая осуществить подстройку оптических осей в канале АОС с помощью данных от ГНСС;

б) методика оценки координат БПЛА на основе анализа «яркости» или величины накопленного заряда пикселей в трех точках на главных диагоналях эллипса, т.е. проекции лазерного луча на фотоматрице приемника;

в) способ компенсации энергетических потерь в двухстороннем канале АОС из-за атмосферных помех и перемещений БПЛА путем регулировки мощности лазерных передатчиков канала АОС на основе вычислений ошибки в оценках

координат БПЛА, полученных из данных от ГНСС и расчетов «яркости» пикселей проекции конуса света на ФМ.

4. Предложен вариант организации связи оператора и БПЛА без ГНСС в условиях отсутствия или недоступности спутниковой навигации. Для этого разработаны:

а) структурная схема организации связи двухстороннего канала АОС с БПЛА, позволяющая осуществить подстройку оптических осей в канале АОС с помощью анализа проекции конуса света на фотоматрице;

б) способ восстановления контура эллипса (проекции света на ФМ) из-за турбулентности в атмосфере с помощью алгоритмов компьютерного зрения и искусственных нейронных сетей;

в) методика оценки координат БПЛА, основанная на обработке оптического «следа» (проекции конуса света) на фотоматрице стационарного пункта с помощью проективной геометрии;

г) методика формирования сигнала адаптивной регулировки мощности передатчиков путем вычисления ошибки в расчетах пространственных координат БПЛА двумя способами: на основе проективной геометрии и уравнения оптического баланса;

д) принцип построения оптической фазированной антенной решетки ОФАР для формирования восходящего канала связи на основе полусферы из фотонно-кристаллических волокон ФКВ, управляемых с помощью специальной матрицы и жидкокристаллических затворов.

5. Рассмотрены методы повышения качества и дальности АОС за счет применения новых материалов (обогащенных наноструктур) оптоэлектроники:

а) показано, что использование обогащенных полупроводников (например, из арсенида галлия) и квантовых структур (множественных квантовых ям - МКЯ, сверхрешеток - СВР) позволяет снизить уровень внутренних шумов, повысить квантовую эффективность, коэффициент поглощения и обнаруживающую способность фотоприемников;

б) проведенное математическое моделирование энергетических характеристик наноструктур подтвердило возможность создания новых материалов с заданными оптоэлектронными характеристиками;

в) показано, что переход на новую элементную базу оптоэлектроники позволяет на порядки снизить вероятность ошибки при приеме сигнала, увеличить энергетический бюджет системы, повысить функциональную надежность, дальность и устойчивость канала связи к воздействию атмосферных помех.

6. Практическая значимость работы подтверждена внедрением результатов в Управлении железных дорог Вьетнама, в учебном процессе кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), в учебном процессе кафедры кибернетики факультета электротехники и электроники Университета транспорта и коммуникаций (город Ханой, Вьетнам). Разработанные методики и алгоритмы позволяют проектировать высоконадежные и защищенные системы оптической связи с БПЛА для применения в условиях, где использование радиоканалов невозможно или неэффективно.

Таким образом, в диссертации решена важная научно-техническая задача разработки и обоснования методов построения и повышения эффективности атмосферных оптических систем связи для подвижных объектов. Полученные результаты вносят вклад в теорию и практику атмосферной оптической связи и могут быть использованы при проектировании перспективных систем связи, навигации и управления для БПЛА и других подвижных платформ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на экспериментальную апробацию предложенных систем и алгоритмов, а также на оптимизацию параметров оптических компонентов АОС для конкретных условий применения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АОС – атмосферная оптическая связь;
- БОКС – беспроводной оптический канал связи (название приемопередатчика АОС);
- БПЛА – беспилотный летательный аппарат;
- РЭБ - радиоэлектронная борьба;
- ФП – фотоприёмник;
- ФМ – фотоматрица;
- ФД – фотодетектор;
- МКЯ – множественные квантовые ямы;
- К/З – компьютерное зрение;
- КЯ – квантовая яма;
- ФП на МКЯ – фотоприёмник на множественных квантовых ямах;
- ОК – объемный кристалл;
- СВР – сверхрешётка;
- СП – стационарный пункт;
- $\rho_{вых}^2$ – отношение с/ш на выходе ФП;
- η – квантовая эффективность;
- λ – длина волны света;
- $I_{тем}$ – темновой ток;
- q – заряд электрона;
- D – обнаруживающая способность ФД;
- R – чувствительность ФД;
- g – коэффициент усиления;
- α – коэффициент поглощения света;
- $\lambda_{зр}$ – длинноволновая граница фотоэффекта;
- $m_{эф}$ – эффективная масса электрона;
- $\psi(x)$ – волновая функция электрона;
- μ_n – подвижностью электрона;

p_0 – концентрация электронов в отсутствии света;

τ – время жизни носителя заряда;

N – число КЯ;

Δf – ширина полосы детектирования;

$P_{ш}$ – мощность шума ФД (порог чувствительности);

$P_{вх}$ – мощность излучения на входе ФД;

$P_{ош}$ – вероятности ошибки на выходе ФП;

E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника;

E_n – уровень квантования;

$\Delta E_{щ}$ – ширина щели СВР;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика интернета и соцсетей на 2024–2025 год: цифры и тренды в мире и в России // Web-Canape : [сайт]. – 2024. – URL: <https://www.web-canape.ru/business/statistika-interneta-i-socsetej-na-2025-god-cifry-i-trendy-v-mire-i-v-rossii/> (дата обращения: 30.01.2023).
2. Measuring digital development: Facts and Figures 2023 / International Telecommunication Union (ITU). – Geneva : ITU, 2023. – 62 p. – URL: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/facts/default.aspx> (дата обращения: 30.03.2024).
3. FSO (технология) // Академик : [сайт]. – 2010. – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/725898> (дата обращения: 30.03.2024).
4. Rappaport, T. S. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! / T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus et al. // IEEE Access. – 2013. – Vol. 1. – P. 335–349. – DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
5. FSO технология и ее история // АО «Мостком» : [сайт]. – URL: <https://old.mostkom.ru/fsotech.htm> (дата обращения: 30.03.2024).
6. Фотоальбом оборудования // АО «Мостком» : [сайт]. – URL: <https://old.mostkom.ru/album.htm> (дата обращения: 30.03.2024).
7. Антонов, А. А. Атмосферная оптическая связь. Области применения / А. А. Антонов, Л. М. Журавлёва, С. С. Алиев, М. А. Нилов // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 10. – С. 23–26. – DOI: 10.62994/AT.2024.10.10.005.
8. Ивашевский, М. Р. Системы видеонаблюдения для повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте : дис. ... канд. техн. Наук : 05.12.13 / Ивашевский Михаил Романович. – Москва, 2019. – 178 с.
9. Top 10 leading companies in the global free space optics communication technology market // Emergen Research : [сайт]. – 2023. – Apr. – URL: <https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-leading-companies-in-the-global-free-space-optics-communication-technology-market> (Дата обращения: 30.03.2024).

10. Чыонг, Д. Х. Сеть атмосферной оптической связи на базе беспилотных летательных аппаратов / А. А. Антонов, Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг // Проектирование и технология электронных средств. – 2024. – № 2. – С. 3–9.

11. Полтавский, А. В. Телекоммуникация систем связи и управления на платформах беспилотных воздушных судов / А. В. Полтавский // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 12–23.

12. Геоскан. Наши услуги // Геоскан. [Электронный ресурс]: <https://www.geoscan.ru/ru/services>. Доступ: 15.05.2026.

13. Российский и мировой рынок межмашинных коммуникаций и Интернета Вещей по итогам 2020 года, предварительные оценки на 2021 год и прогноз до 2025 года // J'son & Partners Consulting : [сайт]. – 2022. – URL: <https://json.tv/analytic/rossiyskiy-i-mirovoy-rynok-mejmashinnyh-kommunikatsiy-i-interneta-veschey-po-itogam-2020-goda-predvaritelnye-otsenki-na-2021-god-i-prognoz-do-2025-goda-20220115025817/> (дата обращения: 30.03.2024).

14. Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети — новое приложение интернета вещей / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных статей IV Международной научно-технической и научно-методической конференции (г. Санкт-Петербург, 2015 г.). – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2015. – С. 17–22.

15. Чыонг, Д. Х. Возможности применения беспроводных оптических каналов связи для беспилотных летательных аппаратов – издания «Соискатель» – приложение к журналу «Мир транспорта». – г. Москва – 2024. – № 2. С. 34–39.

16. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Учеб. Пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., стереот. – Москва: Физматлит, 2005. – 652 с.

17. Архипов, В. А. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания : учебное пособие / В. А. Архипов, Б. С. Сазонов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2012. – 136 с.

18. Новикова, В. А. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике: учебное пособие / В. А. Новикова. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – 39 с.

19. Чыонг, Д. Х. Перспективы беспроводного оптического канала связи / А. А. Антонов, Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 17–20.

20. Кузнецов, С. Н. Беспроводной канал 10 Гбит/с: ключевые особенности и результаты тестирования / С. Н. Кузнецов, С. Ю. Поляков, О. Алали, Б. Хашем // Инновации в науке, производстве и образовании : сборник трудов Международной научно-практической конференции (г. Рязань, 14–16 октября 2013 г.). – Рязань, 2013. – С. 83–91.

21. Вентцель, Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Радио и связь, 1983. – 416 с.

22. Чыонг, Д.Х. Эффективность каналов управления беспилотными летательными аппаратами / С.С. Алиев, Д. Х. Чыонг, И. Г. Александрин, Л. М. Журавлева – Сборник трудов Всероссийской научно-практической студенческой конференции «Недели науки – 2024». – М.: РУТ (МИИТ).

23. Журавлева, Л. М. Изотоптроника — новое направление нанонауки / Л. М. Журавлева, В. Г. Плеханов // Нанотехника. – 2012. – № 1. – С. 88–93.

24. Чыонг, Д. Х. Система мониторинга удаленных объектов с помощью БПЛА на основе технологий MESH и гибридных сетей 5G NTN / Л. М. Журавлева, А. Ю. Стретий, Д. А. Абакумов, Д. Х. Чыонг, В. С. Майоров – Сборник трудов XVII Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2026, 01 - 03 июля 2026 г. Владимир.

25. Чыонг, Д. Х. Атмосферный оптический канал управления беспилотными летательными аппаратами / Л. М. Журавлева, Д. Х. Чыонг, С. С. Алиев, А. Ю. Стретий, Александрин И. Г. – Интеллектуальные транспортные системы: материалы III Международной научно-практической конференции

«Интеллектуальные транспортные системы» (30 мая 2024 г.) — [Электронный ресурс] / — Москва: РУТ (МИИТ). — 2024. — С.770-774.

26. Чыонг, Д. Х. Беспроводный оптический канал связи с подвижными объектами / Л. М. Журавлёва, В. В. Левшунов, Д. А. Рыжков, Д. Х. Чыонг // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 1. — С. 13–16. — DOI: 10.34649/AT.2022.1.1.003.

27. Кузяков, Б. А. Активные и пассивные ретрансляторы в лазерных линиях связи с применением квадрокоптеров / Б. А. Кузяков, В. В. Арестов, Н. А. Малянов, К. Д. Прошин // Сборник научных трудов XXIX Международной конференции. — Москва, 2018. — Т. 29. — С. 76–80.

28. Чыонг, Д. Х. Вопросы повышения безопасности в беспроводных технологиях передачи информации / Л. М. Журавлева, В. В. Левшунов, Д. А. Рыжков, Д. Х. Чыонг // Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика». — г. Уфа. — 2021. — С. 43–48.

29. Зеленюк, И. Ю. Влияние погодных условий на надежность атмосферной оптической связи / И. Ю. Зеленюк, И. В. Огнев, С. Ю. Поляков, С. Е. Широбакин // Вестник связи. — 2002. — № 4. — С. 85–97.

30. Керносов, М. Ю. Снижение уровня ошибок при передаче высокочастотных оптических сигналов в условиях турбулентной атмосферы за счет использования статистики уровня приемного сигнала / М. Ю. Керносов, С. Н. Кузнецов, Б. И. Огнев, А. А. Паршин // Фотоника. — 2020. — Т. 14, № 5. — С. 424–436.

31. Zhang, Y. Design of a Free Space Optical Communication System for an Unmanned Aerial Vehicle Command and Control Link / Y. Zhang, Y. Wang, Y. Deng, A. Du, J. Liu // Photonics. — 2021. — Vol. 8, no. 5. — Art. 163.

32. Патент на изобретение № 2750237 С1 Российская Федерация, МПК H04B 10/00. Система двусторонней беспроводной оптической связи : № 2020130839 : заявл. 18.09.2020 : опубл. 24.06.2021 / Журавлева Л. М., Лошкарев В.

Л., Ивашевский М. Р., Левшунов В. В., Нилов М. А. ; патентообладатель РУТ (МИИТ). – Бюл. № 18.

33. Najafi, M. Statistical modeling of the FSO fronthaul channel for UAV-based communications / M. Najafi, H. Ajam, V. Jamali, P. D. Diamantoulakis, G. K. Karagiannidis, R. Schober // IEEE Transactions on Communications. – 2020. – Vol. 68, no. 6. – P. 3720-3736.

34. Чыонг, Д. Х. Перспективный канал связи для управления беспилотным летательным аппаратом / Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг, М. А. Нилов, А. Ю. Стретий – Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта». – г. Екатеринбург. – 2024. – С.84–86.

35. Клоков, А. Беспроводная оптическая связь. Мифы и реальность / А. Клоков // Технологии и средства связи. – 2001. – № 2. – С. 42–47.

36. Чыонг, Д. Х. Радио/оптоволоконный канал связи с беспилотным летательным аппаратом /Л. М. Журавлева, А. Ю. Стретий, Д. Х. Чыонг – Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Недели науки – 2025». – М.: РУТ (МИИТ).

37. McManamon, P. F. Optical phased array technology / P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 1996. – Vol. 84, no. 3. – P. 268–298. – DOI: 10.1109/5.482231.

38. Чыонг, Д. Х. Беспроводный оптический канал связи управления беспилотным летательным аппаратом / Л. М. Журавлева, Д. Х. Чыонг, С. С. Алиев [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2024. – № 1. – С. 11–16.

39. Simon, M. K. Digital Communication over Fading Channels : A Unified Approach to Performance Analysis / M. K. Simon, M. S. Alouini. – New York : John Wiley & Sons, 2000. – 584 p. – ISBN 0-471-20069-7.

40. Зубов, В. И. Функции Бесселя : учебно-методическое пособие / В. И. Зубов. – Москва : МФТИ, 2007. – 51 с.

41. Мартинес-Дуарт, Дж. М. Нанoeлектроника для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда ; пер. с англ. – Москва : Техносфера, 2007. – 367 с.

42. Биард, Р. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р. У. Биард, Т. У. МакЛэйн ; пер. с англ. – Москва : Техносфера, 2021. – 312 с.

43. Патент на изобретение №2841515. Система двустороннего беспроводного оптического канала связи с беспилотным летательным аппаратом / Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг, М. А. Нилов; патентообладатель РУТ (МИИТ). - № 2024121948; заявл. 01.08.2024; решение о выдаче патента от 01.04.2025.

44. Блинов, Л. М. Локальный переход Фредерикса в нематических жидких кристаллах / Л. М. Блинов, С. А. Давидян, С. Ю. Захаров [и др.] // Кристаллография. – 1984. – Т. 29, № 3. – С. 537–541.

45. Блинов, Л. М. Жидкие кристаллы: структура и свойства / Л. М. Блинов. – Москва : Книжный дом «Либроком», 2013. – 480 с.

46. Чыонг, Д. Х. Особенности применения беспроводного оптического канала связи для гражданских беспилотных летательных аппаратов / Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг, М. А. Нилов, А. Ю. Стретий – сборник трудов Международной научно- практической конференции «Международная научно-практическая конференция «Транспортные системы». – Санкт-Петербург. – Политех-пресс. – 2024. – 193 с. – С.16-20.

47. КОНФИБ-2015: нейросети, конкурентная разведка и защита персональных данных // Университет ИТМО : [сайт]. – 2015. – URL: <https://news.itmo.ru/ru/education/official/news/5323/> (дата обращения: 30.03.2024).

48. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 800 p. – ISBN 978-0262035612.

49. Гудфеллоу, И. Глубокое обучение / И. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 652 с. – ISBN 978-5-97060-618-6.

50. Чыонг, Д. Х. Комбинированный метод компьютерного зрения и сверточной нейронной сети для восстановления эллиптической проекции в системах атмосферной оптической связи с беспилотными летательными аппаратами // Сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции «Современные исследования: теория, практика, результаты», – Москва, 2026. – С. 188 – 193.

51. Russell, S. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S. Russell, P. Norvig. – 4th ed. – Upper Saddle River : Pearson, 2020. – 1166 p.

52. How Neural Network Models in Machine Learning Work // Turing: [сайт]. – URL: <https://www.turing.com/kb/how-neural-network-models-in-machine-learning-work> (дата обращения: 02.05.2022).

53. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. Кн. 1 / С. Зи ; пер. с англ. – Москва: Мир, 1984. – 456 с.

54. Журавлева, Л. М. Новые материалы в оптоэлектронике / Л. М. Журавлева, М. Р. Ивашевский, И. Ф. Музафаров // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 2. – С. 74–83.

55. Критерии выбора архитектуры системы связи. Функциональные задачи управления сетью связи // Студопедия : [электронный ресурс]. – URL: https://studopediasu.com/10_35917_kriterii-vibora-arhitekturi-sistemi-svyazi.html (дата обращения: 30.03.2024).

56. Использование полупроводниковых фотоприемников в космической технике // Present5 : [сайт]. – URL: <https://present5.com/ispolzovanie-poluprovodnikovyx-fotopriemnikov-v-kosmicheskoy-texnike/> (дата обращения: 14.10.2019).

57. Богданова, В. А. Эффективная масса электронов в сильно легированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов / В. А. Богданова, Н. А. Давлеткильдеев, Н. А. Семиколонова, Е. Н. Сидоров // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 4. – С. 407–411.

58. Усанов, Д. А. Компьютерное моделирование наноструктур : учебное пособие / Д. А. Усанов, Ал. В. Скрипаль, Ан. В. Скрипаль, А. В. Абрамов. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 2013. – 100 с.

59. Что такое инфракрасное окно? // Global Sensor Technology (GST) : [сайт]. – URL: <https://www.gst-ir.net/ru/news-events/infrared-knowledge/277.html> (дата обращения: 30.03.2024).

60. Zhuravleva, L. M. New Isotopic Materials for Optoelectronics / L. M. Zhuravleva, N. M. Legkii // Nanotechnologies in Russia. – 2017. – Vol. 12, no. 9–10. – P. 545–552.

61. Zhuravleva, L. M. Improving the Quality of Photodetectors Using Isotopic Nanoengineering Methods / L. M. Zhuravleva, N. M. Legkii // Nanotechnologies in Russia. – 2019. – Vol. 14, no. 3–4. – P. 108–112.

62. Розеншер, Э. Оптоэлектроника / Э. Розеншер, Б. Винтер ; пер. с франц. под ред. О. Н. Ермакова. – 2-е изд. – Москва : Техносфера, 2004. – 592 с.

63. Чыонг, Д. Х. Области применения беспроводной оптической связи / Л. М. Журавлева, С. С. Алиев, Д. Х. Чыонг, М. А. Нилов – Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества. – Гомель: БелГУТ, – 2024. – 360 с. – С.213-215.

64. Оборудование FSO серии M1-10GE // АО «Мостком» : [сайт]. – URL: <https://old.mostkom.ru/products/m1-10ge/fsoM10GE.htm> (дата обращения: 30.03.2024).

65. KAI-29050 Image Sensor Performance Specification // 1stVision, Inc. : [сайт]. – URL: https://www.1stvision.com/cameras/sensor_specs/KAI-29050LongSpec.pdf (дата обращения: 30.03.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Для расчета параметров АОС заданных величин, нужно также учесть конструктивные особенности оборудования и его характеристики, а также использовать общепризнанную модель атмосферы.

Для моделирования и расчетов используется пакет прикладных программ Matlab.

Зависимость доступности канала связи от погодных условий и турбулентности является важным недостатком аппаратуры БОКС. Погодные условия сильно влияют на доступность связи БОКС, т.к. возникают разные уровни затухания.

В таблице А.1 показаны уровни затухания при различных погодных условиях для связи по атмосферному каналу в инфракрасном диапазоне 850 нм [63].

Таблица А.1 – Уровни затухания БОКС в зависимости от погодных условий

Погодные условия	Затухание, дБм/км
Ясная погода	0 – 3
Слабый дождь	3 – 6
Сильный дождь	6 – 17
Снег	6 – 26
Легкий туман	20 – 30
Густой туман	50 – 100

После сравнения характеристик разных приемопередающих модулей, выбран модуль Artolink M1-10GE из-за наиболее качественных характеристик, которые представлены в таблице А.2 [64].

Таблица А.2 – Характеристики приемопередающего модуля Artolink M1-10GE

Длина волны, на которой излучается сигнал λ_m [нм]	1550 785
Мощность передатчика $P_{\text{пер}}$ [дБм]	33
Мощность на входе приемника $P_{\text{пр}}$ [дБм]	30
Полоса пропускания [Мбит/с]	10312,5 Full duplex
Дистанции связи [м] для доступности: 0,999 0,997	500 1500
Способ поддержания направления связи	Система автонаведения
Скорость подстройки направления связи [мрад/с]	2
Вес [кг]: оптический блок блок интерфейсов интерфейсный кабель	9,4 2,15 4,5
Базовые интерфейсы подключения	1 порт 10 Gigabit Ethernet SFP+
Рабочая температура для оптического блока [°C]	-40 ... +50
Потребление мощности [Вт]	46

1. Расчет затухания сигнала в атмосфере $P_{\text{атм}}$

$$P_{\text{атм}} = W \cdot L, \quad (\text{А.1})$$

где W – удельное затухание сигнала в атмосфере (дБм/км), L – расстояние в км.

Выполняется расчет затухания сигнала в атмосфере для различных погодных условий, а также выбирается среднее удельное затухание сигнала в атмосфере W для различных погодных условий (см. табл. А.3).

В табл. А.3 приведены значения затуханий сигнала в атмосфере при различных погодных условиях для разных значений расстояния.

Таблица А.3 – Затухание сигнала в атмосфере при различных погодных условиях для разных значений расстояния

Погодные условия	Среднее удельное затухание сигнала в атмосфере W [дБм/км]	Затухание сигнала в атмосфере $P_{\text{атм}}$ [дБм] при различных значениях расстояния L [км]				
		$L_1 = 0,1$	$L_2 = 0,2$	$L_3 = 0,3$	$L_4 = 0,4$	$L_5 = 0,5$
		$P_{\text{атм1}}$	$P_{\text{атм2}}$	$P_{\text{атм3}}$	$P_{\text{атм4}}$	$P_{\text{атм5}}$
Ясная погода	1,5	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75
Слабый дождь	4,5	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25
Сильный дождь	12	1,2	2,4	3,6	4,8	6
Снег	18	1,8	3,6	5,4	7,2	9
Легкий туман	25	2,5	5	7,5	10	12,5
Сильный туман	80	8	16	24	32	40

Ниже приведен график зависимости затухания сигнала в атмосфере $P_{\text{атм}}$ [дБм] от дальности БПЛА L [км] при различных погодных условиях (рис. А.1).

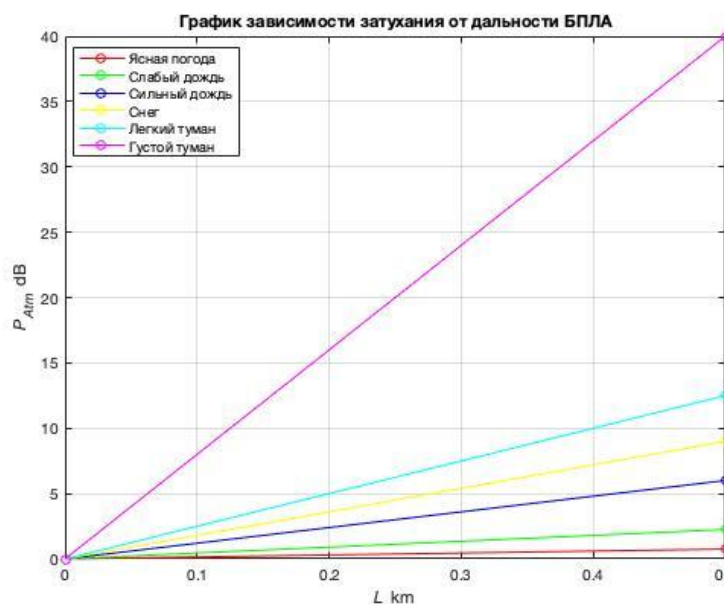


Рисунок А.1 – График зависимости затухания от дальности БПЛА при разных погодных условиях

2. Расчет оптических потерь (расхождения луча) P_{npr}

Оптические потери (расхождение луча) P_{npr} можно рассчитать из соотношения площади пятна от луча на стороне приемника к площади линзы этого приемника, поэтому для каждой дистанции величина будет постоянной.

Уменьшить P_{npr} возможно уменьшением угла расхождения луча, но при очень малых углах расхождения, приемопередающие устройства становятся очень чувствительными к стабильности положения опор и дрожанию атмосферы в жаркий период. Для компенсации нестабильности опор можно применить системы автокоррекции положения, а для избежание от влияния дрожания атмосферы нужно только расширять луч. При слишком большом угле расхождения резко увеличиваются потери P_{npr} , поэтому оптимальная величина угла расхождения лежит в пределах от 2 до 10 *мрад*.

Оптические потери за счет особенностей распространения оптического луча вычисляется по формуле (А.2):

$$P_{npr} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right), \text{ дБм} \quad (\text{А.2})$$

где $S_{\text{пятна}}$ – площадь пятна (м^2); $S_{\text{прием}}$ – площадь приема на фотоматрице (м^2).

$S_{\text{прием}}$ – техническая характеристика лазера, равная 0,0001 м^2 .

В качестве минимально допустимого значения угол расхождения луча φ задается равным 2 *мрад* (0,002 *рад*), а диаметр входной линзы D принимается равным 100 *мм* (0,1 *м*), т. е.:

$$\varphi = 0,002 \text{ рад}; D = 0,1 \text{ м}.$$

$$S_{\text{пятна}} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = 7,8540 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}^2 \quad (\text{А.3})$$

Оптические потери будут: $P_{npr} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right) = -18,9509 \text{ дБ}$.

3. Расчет дальности АОС ϑ

Дальность видимости ϑ вычисляется по формуле: $\vartheta = \frac{17}{W}$, *км* и приведены в табл. А.4:

Таблица А.4 – Дальность видимости при разных погодных условиях

Погодные условия	Затухание сигнала в атмосфере W [дБм/км]	Дальность видимости ϑ [км]
Ясная погода	1,5	11,3333
Слабый дождь	4,5	3,7778
Сильный дождь	12	1,4167
Снег	18	0,9444
Легкий туман	25	0,68
Густой туман	80	0,2125

Ниже приведен график зависимости дальности видимости ϑ [км] от затухания W [$\frac{\text{дБм}}{\text{км}}$] при разных погодных условиях (рис. А.2).

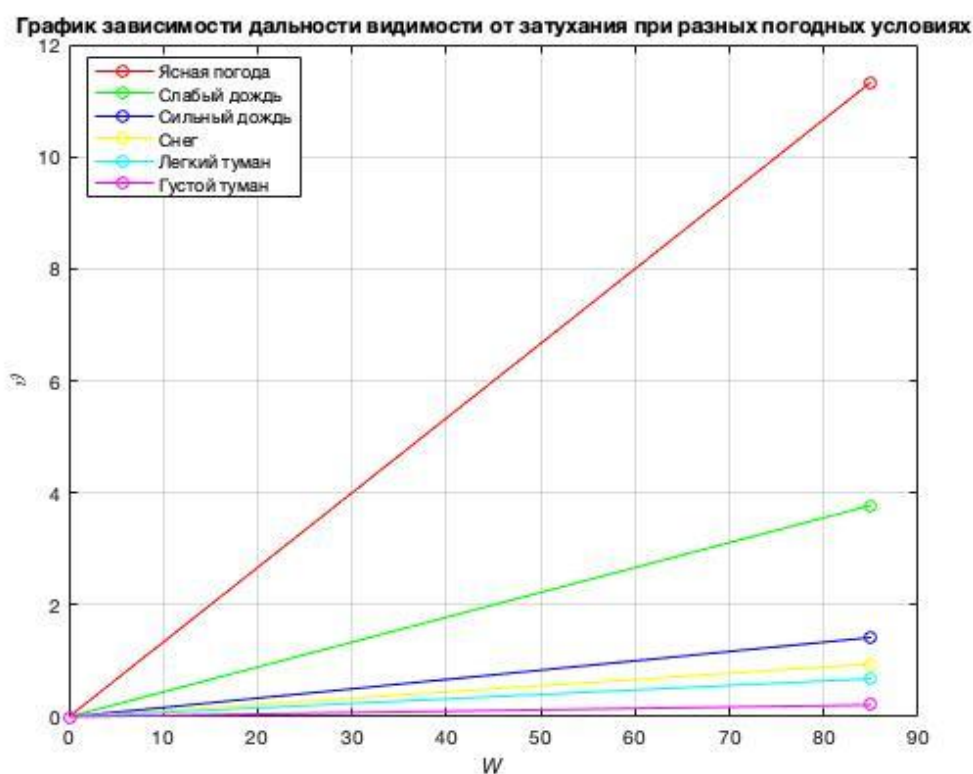


Рисунок А.2 – График зависимости дальности видимости от затухания при разных погодных условиях

4. Расчет общих энергетических потерь $P_{общ}$

Общие энергетические потери ($P_{общ}$) складываются из геометрических потерь, обусловленных расходимостью лазерного луча ($P_{ппр}$), потерь в связи с поглощением и рассеиванием сигнала при распространении через атмосферу ($P_{атм}$) и за счет оптического согласования линз ($P_{опт}$):

$$P_{общ} = P_{опт} + P_{атм} + P_{ппр}, \quad \text{дБм} \quad (\text{A.4})$$

Из всех составляющих только величина $P_{опт}$ не зависит от расстояния между оптическими блоками и для большинства систем находится в диапазоне от 1 до 2 дБм. В этом расчете выбираем $P_{опт} = 1 \text{ дБм}$. Две остальные величины, кроме прямой зависимости от расстояния, зависят от телесного угла, в котором распространяется поток, размера линзы приемника и от физических характеристик атмосферы (для $P_{атм}$).

$$P_{общ} = 10 \lg \left(\frac{S_{пятна}}{S_{прием}} \right) + W \cdot L + 1, \quad \text{дБм} \quad (\text{A.5})$$

Следовательно, для разных погодных условий при разных значениях расстояния будут разные энергетические потери, приведены в табл. А.5:

Таблица А.5 – Общие энергетические потери при различных погодных условиях для разных значений расстояния

Погодные условия	Среднее удельное затухание сигнала в атмосфере W [дБм/км]	Общие энергетические потери $P_{общ}$ [дБм] при различных значениях расстояния L [км]				
		$L_1 = 0,1$	$L_2 = 0,2$	$L_3 = 0,3$	$L_4 = 0,4$	$L_5 = 0,5$
		$P_{общ1}$	$P_{общ2}$	$P_{общ3}$	$P_{общ4}$	$P_{общ5}$
Ясная погода	1,5	-17,9009	-17,6509	-17,5009	-17,3509	-17,2009
Слабый дождь	4,5	-17,5009	-17,0509	-16,6009	-16,1509	-15,7009
Сильный дождь	12	-16,7509	-15,5509	-14,3509	-13,1509	-11,9509
Снег	18	-16,1509	-14,3509	-12,5509	-10,9509	-8,9509
Легкий туман	25	-15,4509	-12,9509	-10,2509	-7,9509	-5,4509
Сильный туман	80	-9,9509	-1,9509	7,9509	15,9509	23,9509

Ниже приведен график зависимости общих энергетических потерь $P_{\text{общ}}$ [дБм] от дальности БПЛА L [км] при различных погодных условиях (рис. А.3):

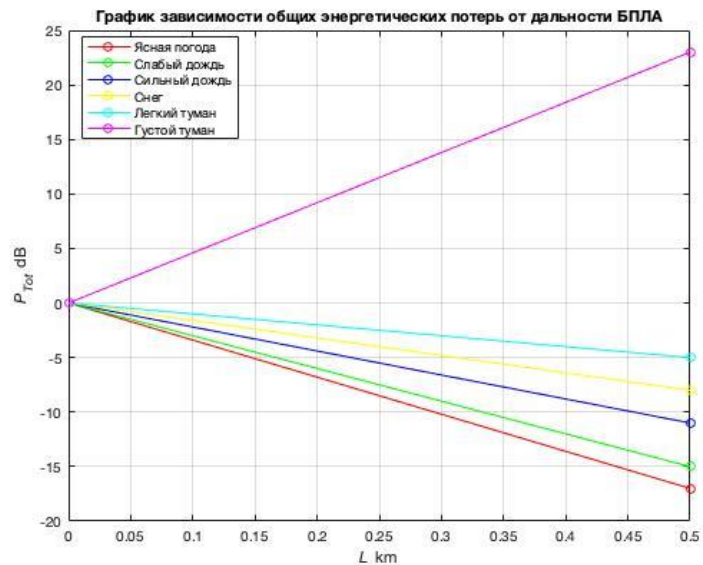


Рисунок А.3 – График зависимости общих энергетических потерь от дальности БПЛА при разных погодных условиях

5. Расчет энергетического баланса (потенциала) и яркости пятна на фотоматрице P_3

Для расчета энергетического баланса P_3 принимается ряд упрощений:

- 1) расчет ведется для систем передачи информации по атмосферному каналу с использованием лазера;
- 2) нелинейными эффектами можно пренебречь;
- 3) рэлеевским рассеянием можно пренебречь;
- 4) мультипликативными помехами рассеяния вперед можно пренебречь;
- 5) в выбранном окне прозрачности отсутствуют сильные полосы молекулярного поглощения;
- 6) максимальное отклонение луча из-за турбулентности атмосферы – 1 *мрад*;
- 7) затухание сигнала на наклонной трассе для высот до 10 км всегда меньше, чем на горизонтальной трассе той же протяженности на высоте 0 км над уровнем земли.

$P_{\Sigma} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}$ – энергетический баланс оптического канала (дБм); $P_{\text{пер}}$ – уровень мощности излучения передатчика и $P_{\text{пр}}$ – уровень мощности излучения на входе приемника.

Из табл.А.2 мы принимаем, что:

$$P_{\text{пер}} = 33 \text{ дБм.}$$

Параметр приемника $P_{\text{пр}}$ зависит от значения величины заряда на пикселях фотоматрицы (ФМ) на самой яркой точке «следа» от наклонного конуса.

$$P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} = P_{\text{общ}} = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}} + P_{\text{ппр}} \quad (\text{А.6})$$

Т.е.:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{общ}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{атм}} - P_{\text{ппр}} \quad (\text{А.7})$$

В табл. А.6 приведены значения параметра приемника $P_{\text{пр}}$ при различных погодных условиях для разных значений расстояния.

Таблица А.6 – Значения параметра приемника $P_{\text{пр}}$ при различных погодных условиях для разных значений расстояния

Погодные условия	Среднее удельное затухание сигнала в атмосфере W [дБм/км]	Параметры приемника $P_{\text{пр}}$ [дБм] при различных значениях расстояния L [км]				
		$L_1 = 0,1$	$L_2 = 0,2$	$L_3 = 0,3$	$L_4 = 0,4$	$L_5 = 0,5$
		$P_{\text{пр1}}$	$P_{\text{пр2}}$	$P_{\text{пр3}}$	$P_{\text{пр4}}$	$P_{\text{пр5}}$
Ясная погода	1,5	20,9009	20,6509	20,5009	20,3509	20,2009
Слабый дождь	4,5	20,5009	20,0509	19,6009	19,1509	18,7009
Сильный дождь	12	19,7509	18,5509	17,3509	16,1509	14,9509
Снег	18	19,1509	17,3509	15,5509	13,9509	11,9509
Легкий туман	25	18,4509	15,9509	13,2509	10,9509	8,4509
Сильный туман	80	12,9509	4,9509	−4,9509	−12,9509	−20,9509

ПРИЛОЖЕНИЕ Б РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ БПЛА ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПУТЕМ

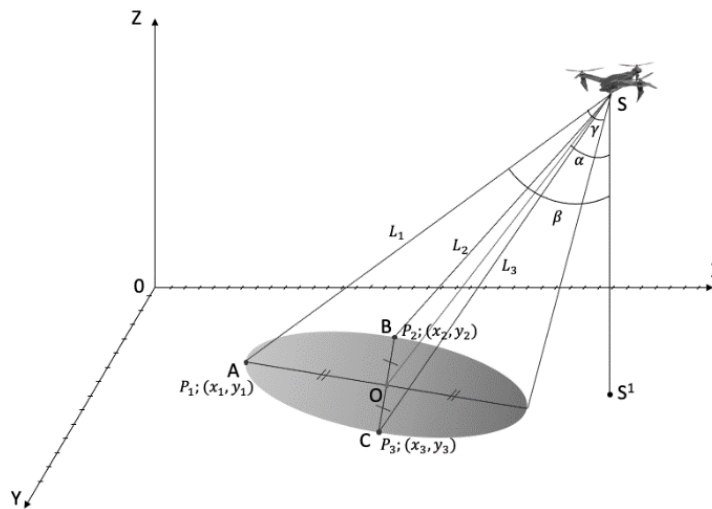


Рисунок Б.1 – положение БПЛА в координатных системах

Параметры передатчика и приемника для примера выбираются в соответствии с характеристиками приемо-передающих модулей Artolink M1-10GE. Передатчик излучает сигнал на длине волны 1550 нм. Мощность передатчика $P_{\text{пер}} = 33 \text{ дБм}$, скорость передачи информации – 10 Гбит/с, а угол расхождения $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад}$ [64].

Для расчета пространственных координат БПЛА проективной геометрии и оптическому балансу была написана программа в *MATHCAD*.

Для расчета пространственных координат БПЛА используются следующие исходные данные:

- 1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад} = 0,03151267873^\circ$;
- 2) углы падения луча $\alpha = 0,27094 \text{ рад} = 15,5237185012745^\circ$, $\beta = 0,27128 \text{ рад} = 15,543199066309^\circ$ соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. Б.1);
- 3) первоначальная высота БПЛА $h = SS^1 = 35 \text{ м}$;
- 4) координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A, B, C на фотоматрице приемника стационарного пункта:

В декартовой системе координат (мм; мм; мм):

Точка A (3,48728; 6,35879);

Точка B (19,87785; 5,90983);

Точка C (8,12215; 22,09017).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A (7,252; 1,5708; 1,0692);

Точка B (20,738; 1,5708; 0,289);

Точка C (23,536; 1,5708; 1,2185).

5) начало координат на ФМ, привязано к координатам места O (0; 0; 0).

Порядок расчета пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи.

На фотоматрице оператора БПЛА получают эллиптический след. Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A , B , C , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $AD = D = 2,6 \text{ см} = 0,026 \text{ м}$ – большая ось эллипса, равная диаметру входной линзы;

б) $BC = d = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координат центра эллипса O :

$$x_O = \frac{x_B + x_C}{2} = \frac{8,12215 + 19,87785}{2} = 14 \text{ мм}; \quad (\text{Б.1})$$

$$y_O = \frac{y_B + y_C}{2} = \frac{22,09017 + 5,90983}{2} = 14 \text{ мм}. \quad (\text{Б.2})$$

1. Расчеты ребер конуса L_2 (SB), L_3 (SC) на основании измеренных на ФМ длин и координат диаметра эллипса из треугольников ΔOSS^I , ΔSBC (рис. Б.1) по следующему алгоритму: а) с помощью прямоугольного треугольника ΔOSS^I при известном угле α можно рассчитать длину оптической оси (гипотенузы SO); б) с применением теоремы косинусов для треугольника ΔSBC при известном угле γ возможно рассчитать L_3 (SC) и L_2 (SB).

Расчет длины оптической оси (гипотенузы SO) из прямоугольного треугольника ΔOSS^1 при известном угле α .

По треугольнику ΔOSS^1 , следовательно, можно рассчитать SO :

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SO} \Rightarrow SO = \frac{SS^1}{\cos \alpha} = \frac{35}{\cos(0,27094)} = 36,32515083593827 \text{ м.} \quad (\text{Б.3})$$

Теорема косинусов в треугольнике SBC :

$$BC^2 = SB^2 + SC^2 - 2 \cdot SB \cdot SC \cdot \cos(BSC)$$

$$d^2 = SB^2 + SC^2 - 2 \cdot SB \cdot SC \cdot \cos(\gamma)$$

$$0,02^2 = SB^2 + SC^2 - 2 \cdot SB \cdot SC \cdot \cos(0,00055).$$

Поскольку отрезок SO является медианой данного треугольника, уравнение медианы записывается в следующем виде:

$$SO = \frac{1}{2} \sqrt{2SB^2 + 2SC^2 - BC^2} = 36,32515083593827.$$

$$\Rightarrow SC = 36,32561212754950783 \text{ м; } SB = 36,32469229141664426 \text{ м.}$$

2. Расчеты ребер конуса L_1 (SA) из прямоугольного треугольника ΔASS^1 при известном угле β .

Из треугольника ΔASS^1 длина отрезка SA рассчитывается следующим образом:

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SA} \Rightarrow SA = \frac{SS^1}{\cos \beta} = \frac{35}{\cos(0,27128)} = 36,32858387744396 \text{ м.} \quad (\text{Б.4})$$

3. Расчет пространственных координат БПЛА (X , Y , Z) на основании решения системы из трех уравнений:

$$\begin{cases} (X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2 + (Z - z_0)^2 = SO^2 \\ (X - x_A)^2 + (Y - y_A)^2 + (Z - z_A)^2 = SA^2 \\ Z = h \end{cases} \quad (\text{Б.5})$$

Приведенная выше система уравнений может быть преобразована к виду:

$$X^2 - 2Xx_0 + x_0^2 + Y^2 - 2Yy_0 + y_0^2 + Z^2 = SO^2$$

$$X^2 - 2Xx_A + x_A^2 + Y^2 - 2Yy_A + y_A^2 + Z^2 = SA^2$$

$$Z = h$$

Для решения этой системы уравнений можно использовать различные численные методы, такие как метод Ньютона, итерационные методы или метод Гаусса-Ньютона.

Для расчета используется фотоматрица KAI-29050, характеристики которой указаны в табл. Б.1 [65].



Рисунок Б.2 - Фотоматрица KAI-29050. [65]

Таблица Б.1 - Характеристики фотоматрицы KAI-29050

Параметр	Значение
Структура	Interline CCD; Progressive Scan
Общее количество пикселей	6644 (H) x 4452 (V)
Количество эффективных пикселей	6600 (H) x 4408 (V)
Количество активных пикселей	6576 (H) x 4384 (V)
Размер пикселя	5.5 μm (H) x 5.5 μm (V)
Активный размер изображения	36.17 мм (H) x 24.11 мм (V) 43.47 мм (diag) 35 мм оптический формат
Соотношение сторон	3:2
Количество выходов	1, 2, или 4
Емкость заряда	20.000 электронов
Выходная чувствительность	34 $\mu\text{V}/e^-$

Продолжение таблицы Б.1

Параметр	Значение
Квантовая эффективность КАИ-29050-АХА КАИ-29050-СХА	46% (500 нм) 31%, 43%, 42% (620, 540, и 470 нм)
Темновой ток Фотодиод VCCD	7 электронов/с 140 электронов/с
Температура удвоения темнового тока Фотодиод VCCD	7°C 9°C
Динамический диапазон	64 дБ
Эффективность передачи заряда	0.999999
Подавление цветения	>300 X
Задержка изображения	<10 электронов
Максимальная тактовая частота пикселей	40 МГц
Максимальная частота кадров Четырехъядерный выход Двойной выход Одиночный выход	4 fps 2 fps 1 fps

Как и отмечено в таблице, размеры фотоматрицы равны 36,17х24,11 мм.

Средняя диагональ популярных для управления гражданских БПЛА планшетов примерно 8,9 дюйма, что равно 20,32 см с соотношением экрана 3:2 (27,26 см и 18,18 см соответственно).

Координаты точек (в мм) задаются следующим образом и обозначаются на фотоматрице в принятой системе координат:

Координаты точки А (3,48728; 6,35879);

Координаты точки В (19,87785; 5,90983);

Координаты точки C (8,12215; 22,09017).

Для упрощения расчета все величины переводятся в метры (m):

$$x_A = 3,48728 \text{ мм} = 0,00348278 \text{ м};$$

$$y_A = 6,35879 \text{ мм} = 0,00635879 \text{ м};$$

$$x_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м};$$

$$y_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м};$$

и длины рёбер SA и гипотенузы, рассчитанные выше:

$$SA = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

$$SO = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

$$\begin{cases} (X - 0,00348278)^2 + (Y - 0,00635879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,32858387744396^2 \\ (X - 0,014)^2 + (Y - 0,014)^2 + (Z - 0)^2 = 36,325105233826896^2 \\ Z = h = 35 \end{cases}$$

После расчетов в *MATHCAD*, были получены следующие координаты:

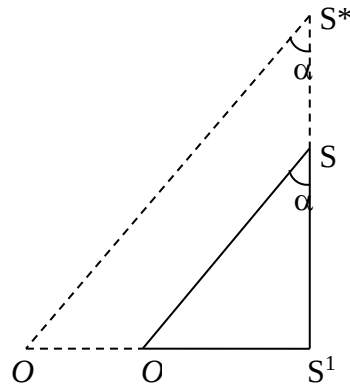
$$\begin{cases} X = 7,6459904232183711878 \text{ м}; \\ Y = 6,0361252418478661332 \text{ м}; \\ Z = 35 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (mm ; rad ; rad): (36,33; 0,27146; 0,6683).

При увеличении начальной высоты беспилотного летательного аппарата (БПЛА) до положения S^* с высотой h^* (предположим, что $h^* = n \cdot h$), наблюдается увеличение размеров образуемого эллипса.

Действительно, угол падения луча между SO и SS^1 остается постоянным. Следовательно, при увеличении высоты угол падения луча $S^1S^*O^*$ равен углу отклонения S^1SO . Применяя теорему Фалеса к треугольнику $S^1S^*O^*$, на основании принципа подобия треугольников записывается следующее соотношение:

$$\frac{S^1S}{S^1S^*} = \frac{S^1O}{S^1O^*} = \frac{SO}{S^*O^*} = \frac{h}{h^*} = \frac{1}{n} \quad (\text{Б.6})$$

Рисунок Б.3 – Треугольники $O^*S^*S^1$ и OSS^1

Аналогично, рассматривая треугольник $S^1S^*A^*$, можно показать, что длина ребра $S^*A^* = n \cdot SA$.

Площадь эллипса вычисляется по формуле: $S = \pi \cdot d \cdot D$, где D - большая ось, d - малая ось эллипса.

Таким образом, при увеличении высоты БПЛА до $h^* = n \cdot h$ площадь эллипса увеличивается в n^2 раз:

$$S^* = \pi \cdot d^* \cdot D^* = \pi \cdot (n \cdot d) \cdot (n \cdot D) = \pi \cdot d \cdot D \cdot n^2 = S \cdot n^2$$

Пример: при увеличении высоты БПЛА до 50 метров, площадь эллипса рассчитывается следующим образом.

Предположен, что на исходной высоте $h = 35$ м, большая и малая оси эллипса составляют: $D = 0,026$ м и $d = 0,02$ м.

Тогда исходная площадь эллипса S равна:

$$S = \pi \cdot 0,02 \cdot 0,026 = 0,0016328 \text{ (м}^2\text{)}.$$

При увеличении высоты до $h^* = 50$ м, новая площадь S^* будет равна:

$$S^* = \pi \cdot 0,02 \cdot 0,026 \cdot \left(\frac{50}{35}\right)^2 = 0,00333224 \text{ (м}^2\text{)}.$$

С течением времени из-за изменения высоты БПЛА происходит увеличение размеров эллипса, формируемого на фотоматрице, со следующими параметрами (рис. Б.4):

- Координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A^* , B^* , C^* на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A^* (1,38120; 4,82798);

Координаты точки B^* (6,94658; 23,70821);

Координаты точки C^* (21,05342; 4,29179).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A^* (5,022; 1,5708; 1,2922);

Точка B^* (24,705; 1,5708; 1,2858);

Точка C^* (21,486; 1,5708; 0,2011).

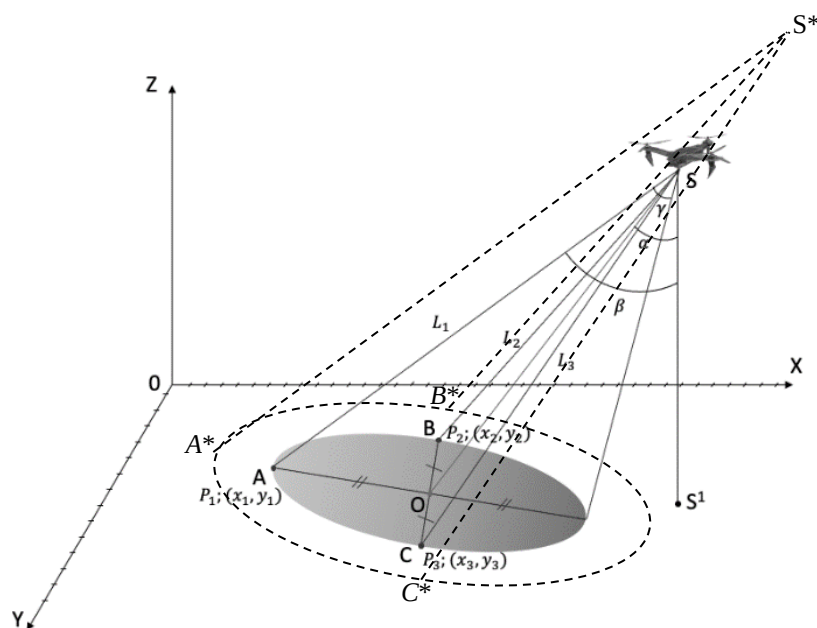


Рисунок Б.4 – Местоположение БПЛА при изменении высоты БПЛА

Требуется проанализировать изменение геометрии эллипса и определить новые пространственные координаты БПЛА.

Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A^* , B^* , C^* , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $A^*D^* = D^* = 3,12 \text{ см} = 0,0312 \text{ м}$ – большая ось эллипса;

б) $B^*C^* = d^* = 2,4 \text{ см} = 0,024 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координаты центра эллипса O находятся как среднее арифметическое координат соответствующих точек:

$$x_O = \frac{x'_B + x'_C}{2} = \frac{6,94658 + 21,05342}{2} = 14 \text{ мм}; \quad (\text{Б.7})$$

$$y_O = \frac{y'_B + y'_C}{2} = \frac{23,70821 + 4,29179}{2} = 14 \text{ мм}. \quad (\text{Б.8})$$

При сравнении площади эллипса S^* с его исходной площадью эллипса S следует отметить, что исходная площадь эллипса S , соответствующая начальной высоте, рассчитывается по формуле площади эллипса через длины его полуосей:

$$S = \pi \cdot 0,02 \cdot 0,026 = 0,0016328 \text{ м}^2.$$

$$\text{Площадь данного эллипса } S^* = \pi \cdot 0,024 \cdot 0,0312 = 0,00235123 \text{ м}^2.$$

Сравнение площадей исходного и нового эллипсов показывает значительное увеличение: $\frac{S^*}{S} = \frac{0,00235123}{0,0016328} = 1,44$.

Увеличение площади в 1,44 раза свидетельствует о существенном изменении масштаба проекции светового луча на фотоматрице.

Сравнение длин осей нового и исходного эллипсов (с осями 0,026 м и 0,02 м соответственно) показывает одинаковый коэффициент линейного увеличения:

$$\frac{D^*}{D} = \frac{0,0312}{0,026} = 1,2; \quad \frac{d^*}{d} = \frac{0,024}{0,02} = 1,2.$$

Полученный коэффициент $n = 1,2$ является ключевым для дальнейших расчетов.

Расчет пространственных координат БПЛА:

Для определения новых координаты БПЛА (X' , Y' , Z') применяется метод трилатерации, основанный на решении системы уравнений:

$$\begin{cases} (X' - x'_A)^2 + (Y' - y'_A)^2 + (Z' - z'_A)^2 = S'A'^2 \\ (X' - x'_B)^2 + (Y' - y'_B)^2 + (Z' - z'_B)^2 = S'B'^2 \\ (X' - x'_C)^2 + (Y' - y'_C)^2 + (Z' - z'_C)^2 = S'C'^2 \end{cases}, \quad (\text{Б.9})$$

где x'_A , x'_B , x'_C , y'_A , y'_B , y'_C – измеренные координаты трех точек (пикселей) на диагоналях эллипса в точках A^* , B^* , C^* относительно начала координат ФМ.

Ребра, связывающие БПЛА с точками A^* , B^* , C^* на фотоматрице, увеличиваются с тем же коэффициентом $n = 1,2$. Тогда можно считать длину ребра:

$$S'A' = 1,2 \cdot SA = 1,2 \cdot 36,32858387744396 = 43,59430065293275;$$

$$S'B' = 1,2 \cdot SB = 1,2 \cdot 36,3246463857685 = 43,5895756629222;$$

$$S'C' = 1,2 \cdot SC = 1,2 \cdot 36,32556682897146 = 43,59068019476575.$$

Система уравнений принимает следующий вид (при условии, что z -координаты точек на плоскости фотоматрицы равны нулю):

$$\begin{cases} (X' - 0,00138120)^2 + (Y' - 0,00482798)^2 + (Z' - 0)^2 = 43,59430065293275^2 \\ (X' - 0,00694658)^2 + (Y' - 0,02370821)^2 + (Z' - 0)^2 = 43,5895756629222^2 \\ (X' - 0,02105342)^2 + (Y' - 0,00429179)^2 + (Z' - 0)^2 = 43,59068019476575^2 \end{cases}$$

Численное решение данной системы уравнений в среде *MATHCAD*, позволяет получить искомые координаты:

$$\begin{cases} X' = 8,265181579277263765 \text{ м;} \\ Y' = 8,4885170691382229871 \text{ м;} \\ Z' = 41,954733608361606961 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат ($мм; рад; рад$): (43,596; 0,2752; 0,7987).

Выводы:

- Новая высота расположения БПЛА составляет $h = Z' = 41,954733608361606961 \text{ м.}$

- Сравнение с исходной высотой $h = 35 \text{ м}$ показывает соотношение:

$$\frac{h'}{h} = \frac{41,954733608361606961}{35} = 1,199.$$

- Полученное отношение высот практически идеально соответствует коэффициенту линейного масштабирования осей эллипса ($n = 1,2$). Данное соответствие подтверждает правильности примененной методики и физическую адекватность модели, связывающей изменение высоты БПЛА с масштабом его проекции на целевую поверхность.

Аналогично предполагается, что через несколько времени, эллипс, полученный на фотоматрице стал меньше исходного из-за влияния изменения высоты БПЛА, со следующими параметрами (рис. Б.5):

- Координаты диагоналей эллипса (в $мм$) для точек A^* , B^* , C^* на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A^* (4,53590; 7,12098);

Координаты точки B^* (8,70993; 21,28115);

Координаты точки C^* (19,29007; 6,71885).

В сферической системе координат ($мм; рад; рад$):

Точка A^* (8,443; 1,5708; 1,0036);

Точка B^* (22,995; 1,5708; 1,1823);

Точка C^* (20,427; 1,5708; 0,33517).

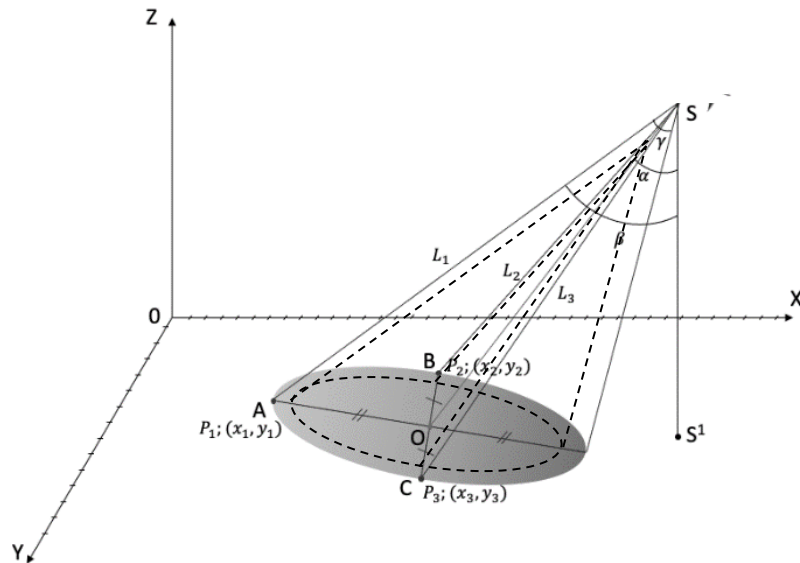


Рисунок Б.5 – Местоположение БПЛА при изменении высоты БПЛА

Требуется проанализировать изменение геометрии эллипса и определить новые пространственные координаты БПЛА.

Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A^* , B^* , C^* , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $A^*D^* = D^* = 2,34 \text{ см} = 0,0234 \text{ м}$ – большая ось эллипса;

б) $B^*C^* = d^* = 1,8 \text{ см} = 0,018 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координаты центра эллипса O находятся как среднее арифметическое координат соответствующих точек:

$$x_O = \frac{x'_B + x'_C}{2} = \frac{8,70993 + 19,29007}{2} = 14 \text{ мм}; \quad (\text{Б.10})$$

$$y_O = \frac{y'_B + y'_C}{2} = \frac{21,28115 + 6,71885}{2} = 14 \text{ мм}. \quad (\text{Б.11})$$

Соотношение между площадью эллипса S^* и его исходной площадью эллипса S определяется следующим образом. Исходная площадь эллипса S , соответствующая начальной высоте, рассчитывается по формуле площади эллипса через длины его полуосей:

$$S = \pi \cdot 0,02 \cdot 0,026 = 0,0016328 \text{ м}^2. \quad (\text{Б.12})$$

Площадь данного эллипса $S^* = \pi \cdot 0,018 \cdot 0,0234 = 0,00132257 \text{ м}^2$.

Сравнение площадей исходного и нового эллипсов показывает значительное уменьшение: $\frac{S^*}{S} = \frac{0,00132257}{0,0016328} = 0,81$.

Изменение площади в 0,81 раза свидетельствует о существенном изменении масштаба проекции светового луча на фотоматрице.

Сравнение длин осей нового и исходного эллипсов (с осями 0,026 м и 0,02 м соответственно) показывает одинаковый коэффициент линейного увеличения:

$$\frac{D^*}{D} = \frac{0,0234}{0,026} = 0,9; \quad \frac{d^*}{d} = \frac{0,018}{0,02} = 0,9.$$

Полученный коэффициент $n = 0,9$ является ключевым для дальнейших расчетов.

Расчет пространственных координат БПЛА:

Для определения новых координаты БПЛА (X' , Y' , Z') применяется метод трилатерации, основанный на решении системы уравнений:

$$\begin{cases} (X' - x'_A)^2 + (Y' - y'_A)^2 + (Z' - z'_A)^2 = S'A'^2 \\ (X' - x'_B)^2 + (Y' - y'_B)^2 + (Z' - z'_B)^2 = S'B'^2 \\ (X' - x'_C)^2 + (Y' - y'_C)^2 + (Z' - z'_C)^2 = S'C'^2 \end{cases}, \quad (\text{Б. 13})$$

где x'_A , x'_B , x'_C , y'_A , y'_B , y'_C – измеренные координаты трех точек (пикселей) на диагоналях эллипса в точках A^* , B^* , C^* относительно начала координат ФМ.

Ребра, связывающие БПЛА с точками A^* , B^* , C^* на фотоматрице, увеличиваются с тем же коэффициентом $n = 0,9$. Тогда можно считать длину ребра:

$$S'A' = 0,9 \cdot SA = 0,9 \cdot 36,32858387744396 = 32,69572548969957;$$

$$S'B' = 0,9 \cdot SB = 0,9 \cdot 36,3246463857685 = 32,69218174719165;$$

$$S'C' = 0,9 \cdot SC = 0,9 \cdot 36,32556682897146 = 32,69301014607431.$$

Система уравнений принимает следующий вид (при условии, что z -координаты точек на плоскости фотоматрицы равны нулю):

$$\begin{cases} (X' - 0,00453590)^2 + (Y' - 0,00712098)^2 + (Z' - 0)^2 = 32,69572548969957^2 \\ (X' - 0,00870993)^2 + (Y' - 0,02128115)^2 + (Z' - 0)^2 = 32,69218174719165^2 \\ (X' - 0,01929007)^2 + (Y' - 0,00671885)^2 + (Z' - 0)^2 = 32,69301014607431^2 \end{cases}$$

Численное решение данной системы уравнений в среде *MATHCAD*, позволяет получить искомые координаты:

$$\begin{cases} X' = 6,2023788471990074143 \text{ м;} \\ Y' = 6,3698932675391769366 \text{ м;} \\ Z' = 31,466050545255417575 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (*мм; рад; рад*): (32,7; 0,27537; 0,7987).

Выводы:

- Новая высота расположения БПЛА составляет $h = Z' = 31,466050545255417575$ м.

- Сравнение с исходной высотой $h = 35$ м показывает соотношение:

$$\frac{h'}{h} = \frac{31,466050545255417575}{35} = 0,899.$$

- Полученное отношение высот практически идеально соответствует коэффициенту линейного масштабирования осей эллипса ($n = 0,9$). Данное соответствие подтверждает правильности примененной методики и физическую адекватность модели, связывающей изменение высоты БПЛА с масштабом его проекции на целевую поверхность.

Для следующего расчета предполагается, что положение эллипса смещается вправо (по оси *Ox*) на 2 см, остальные данные не изменяются (рис. Б.6). Необходимо рассчитать изменение координат БПЛА в этом случае.

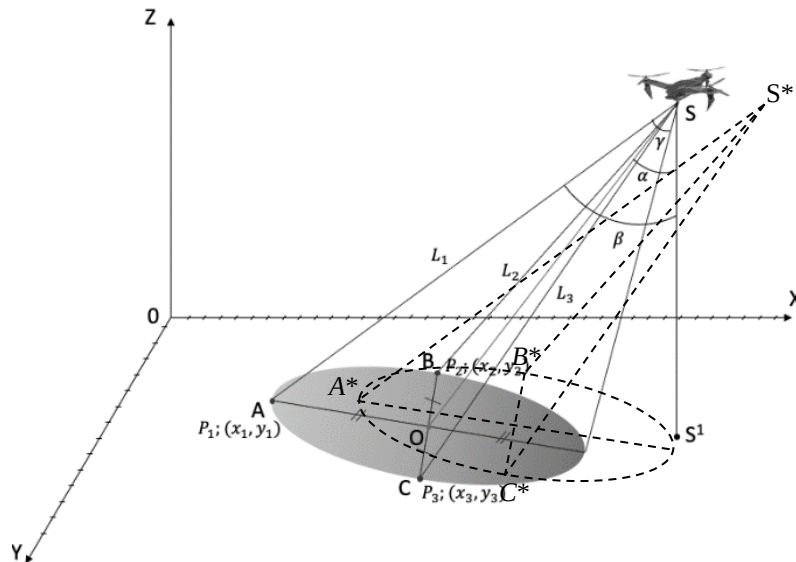


Рисунок Б.6 – Местоположение БПЛА, эллипс смещается вправо (по оси Ox) на 2 см, остальные данные не изменяются

Для расчета пространственных координат БПЛА заданы следующие данные:

1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55$ мрад = 0,00055 рад = 0,03151267873°;

2) углы падения луча $\alpha = 0,27094$ рад = 15,5237185012745°, $\beta = 0,27128$ рад = 15,543199066309° соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. Б.1);

3) первоначальная высота БПЛА $h = SS^1 = 35$ м;

4) координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A, B, C на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A (5,48728; 6,35879);

Координаты точки B (10,12215; 22,09017);

Координаты точки C (21,87785; 5,90983).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A (8,399; 1,5708; 0,8588);

Точка B (24,3; 1,5708; 1,1411);

Точка C (22,66; 1,5708; 0,26383).

5) начало координат на ФМ, привязано к координатам места.

Порядок расчета пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи.

На фотоматрице оператора БПЛА получают эллиптический след. Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A, B, C , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $AD = D = 2,6 \text{ см} = 0,026 \text{ м}$ – большая ось эллипса, равная диаметру входной линзы;

б) $BC = d = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координат центра эллипса O :

$$x_O = \frac{x_B + x_C}{2} = \frac{10,12215 + 21,87785}{2} = 16 \text{ мм}; \quad (\text{Б.14})$$

$$y_O = \frac{y_B + y_C}{2} = \frac{22,09017 + 5,90983}{2} = 14 \text{ мм}. \quad (\text{Б.15})$$

Длины оптической оси (гипотенузы SO) и ребра конуса L_1 (SA) остаются неизменными.

Расчет длин SO и SA :

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SO} \Rightarrow SO = \frac{SS^1}{\cos \alpha} = \frac{35}{\cos(0,27094)} = 36,325105233826896 \text{ м}. \quad (\text{Б.16})$$

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SA} \Rightarrow SA = \frac{SS^1}{\cos \beta} = \frac{35}{\cos(0,27128)} = 36,32858387744396 \text{ м}. \quad (\text{Б.17})$$

Расчет пространственных координат БПЛА (X, Y, Z) основан на решении системы из трех уравнений (Б.18):

$$\begin{aligned} X^2 - 2Xx_0 + x_0^2 + Y^2 - 2Yy_0 + y_0^2 + Z^2 &= SO^2 \\ X^2 - 2Xx_A + x_A^2 + Y^2 - 2Yy_A + y_A^2 + Z^2 &= SA^2 \\ Z &= h \end{aligned} \quad (\text{Б.18})$$

Координаты точек (в метрах):

$$x_A = 5,48728 \text{ мм} = 0,00548278 \text{ м};$$

$$y_A = 6,35879 \text{ мм} = 0,00635879 \text{ м};$$

$$x_0 = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м};$$

$$y_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м};$$

и длины рёбер SA и гипотенузы, рассчитанные выше:

$$SA = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

$$SO = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

Система уравнений в метрах:

$$\begin{cases} (X - 0,00548278)^2 + (Y - 0,00635879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,32858387744396^2 \\ (X - 0,016)^2 + (Y - 0,014)^2 + (Z - 0)^2 = 36,325105233826896^2 \\ Z = h = 35 \end{cases}$$

Решение системы в *MATHCAD* дает следующие координаты:

$$\begin{cases} X = 7,6659904232183711878 \text{ м;} \\ Y = 6,0361252418478661332 \text{ м;} \\ Z = 35 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (мм; рад; рад): (36,335; 0,2719; 0,667).

В рамках следующего расчета предполагается сдвиг эллипса на 2 см влево вдоль оси Ox , остальные данные не изменяются (рис. Б.7). Необходимо определить изменение координат БПЛА.

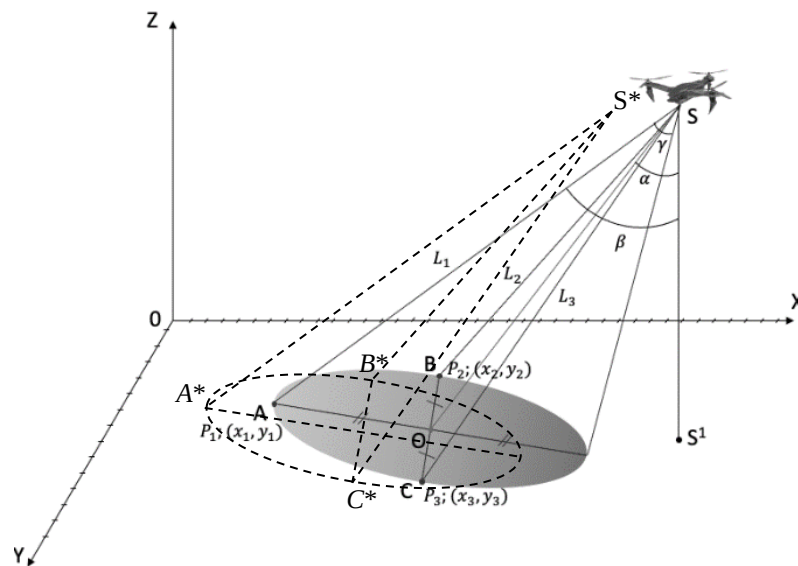


Рисунок Б.7 – Местоположение БПЛА, эллипс смещается на 2 см влево вдоль оси Ox , остальные данные не изменяются

Для расчета пространственных координат БПЛА заданы следующие данные:

1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад} = 0,03151267873^\circ$;

2) углы падения луча $\alpha = 0,27094 \text{ рад} = 15,5237185012745^\circ$, $\beta = 0,27128 \text{ рад} = 15,543199066309^\circ$ соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. Б.7);

3) первоначальная высота БПЛА $h = SS^1 = 35 \text{ м}$;

4) координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A, B, C на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A (1,48728; 6,35879);

Координаты точки B (6,12215; 22,09017);

Координаты точки C (17,87785; 5,90983).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A (6,53; 1,5708; 1,341);

Точка B (22,923; 1,5708; 1,3004);

Точка C (18,83; 1,5708; 0,31926).

5) начало координат на ФМ, привязано к координатам места.

Порядок расчета пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи.

На фотоматрице оператора БПЛА получают эллиптический след. Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A, B, C , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $AD = D = 2,6 \text{ см} = 0,026 \text{ м}$ – большая ось эллипса, равная диаметру входной линзы;

б) $BC = d = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координат центра эллипса O :

$$x_O = \frac{x_B + x_C}{2} = \frac{6,12215 + 17,87785}{2} = 12 \quad \text{мм};$$

$$y_O = \frac{y_B + y_C}{2} = \frac{22,09017 + 5,90983}{2} = 14 \text{ мм}.$$

Длины оптической оси (гипотенузы SO) и ребра конуса L_1 (SA) остаются неизменными.

Расчет длин SO и SA :

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SO} \Rightarrow SO = \frac{SS^1}{\cos \alpha} = \frac{35}{\cos (0,27094)} = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SA} \Rightarrow SA = \frac{SS^1}{\cos \beta} = \frac{35}{\cos (0,27128)} = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

Расчет пространственных координат БПЛА (X, Y, Z) основан на решении системы из трех уравнений:

$$X^2 - 2Xx_0 + x_0^2 + Y^2 - 2Yy_0 + y_0^2 + Z^2 = SO^2 \quad (1)$$

$$X^2 - 2Xx_A + x_A^2 + Y^2 - 2Yy_A + y_A^2 + Z^2 = SA^2 \quad (2)$$

$$Z = h \quad (3)$$

Координаты точек (в метрах):

$$x_A = 1,48728 \text{ мм} = 0,00148278 \text{ м;}$$

$$y_A = 6,35879 \text{ мм} = 0,00635879 \text{ м;}$$

$$x_0 = 12 \text{ мм} = 0,012 \text{ м;}$$

$$y_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м;}$$

и длины рёбер SA и гипотенузы, рассчитанные выше:

$$SA = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

$$SO = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

Система уравнений в метрах:

$$\begin{cases} (X - 0,00148278)^2 + (Y - 0,00635879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,32858387744396^2 \\ (X - 0,012)^2 + (Y - 0,014)^2 + (Z - 0)^2 = 36,325105233826896^2 \\ Z = h = 35 \end{cases}$$

Решение системы в *MATHCAD* дает следующие координаты:

$$\begin{cases} X = 7,6259904232183711878 \text{ м;} \\ Y = 6,0361252418478661332 \text{ м;} \\ Z = 35 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (мм; рад; рад): (36,326; 0,27104; 0,6695).

Исследование влияния смещения эллипса по оси Оу на координаты БПЛА продолжено для величины смещения 2 см (рис. Б.8). Полученные результаты представлены далее.

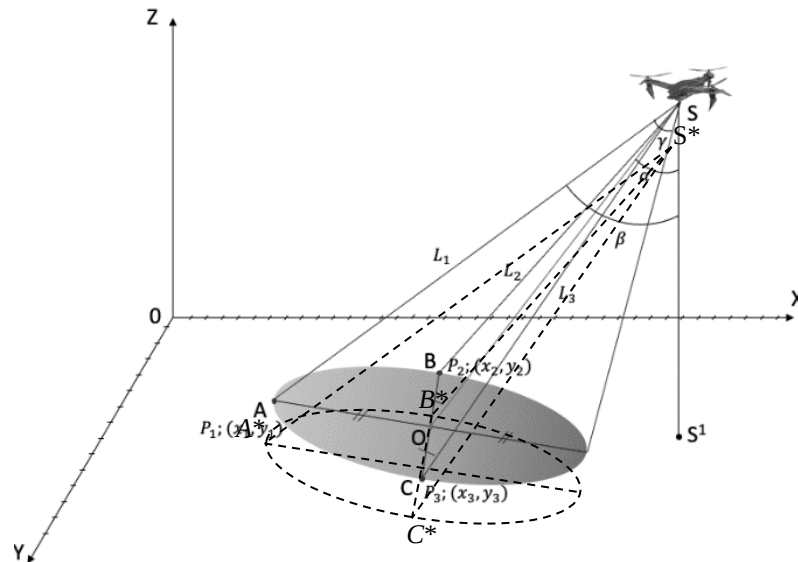


Рисунок Б.8 – Место положения БПЛА, (смещение эллипса по оси Оу на величину 2 см)

Для расчета пространственных координат БПЛА заданы следующие данные:

1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад} = 0,03151267873^\circ$;

2) углы падения луча $\alpha = 0,27094 \text{ рад} = 15,5237185012745^\circ$, $\beta = 0,27128 \text{ рад} = 15,543199066309^\circ$ соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. Б.8);

3) первоначальная высота БПЛА $h = SS^1 = 35 \text{ м}$;

4) координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A, B, C на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A (3,48728; 8,35879);

Координаты точки B (8,12215; 24,09017);

Координаты точки C (19,87785; 7,90983).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A (9,057; 1,5708; 1,1756);

Точка B (25,42; 1,5708; 1,2456);

Точка C (21,394; 1,5708; 0,3787).

5) начало координат на ФМ, привязано к координатам места.

Порядок расчета пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи.

На фотоматрице оператора БПЛА получают эллиптический след. Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A, B, C , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $AD = D = 2,6 \text{ см} = 0,026 \text{ м}$ – большая ось эллипса, равная диаметру входной линзы;

б) $BC = d = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координат центра эллипса O :

$$x_O = \frac{x_B + x_C}{2} = \frac{8,12215 + 19,87785}{2} = 14 \text{ мм};$$

$$y_O = \frac{y_B + y_C}{2} = \frac{24,09017 + 7,90983}{2} = 16 \text{ мм}.$$

Длины оптической оси (гипотенузы SO) и ребра конуса L_1 (SA) остаются неизменными.

Расчет длин SO и SA :

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SO} \Rightarrow SO = \frac{SS^1}{\cos \alpha} = \frac{35}{\cos (0,27094)} = 36,325105233826896 \text{ м}.$$

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SA} \Rightarrow SA = \frac{SS^1}{\cos \beta} = \frac{35}{\cos (0,27128)} = 36,32858387744396 \text{ м}.$$

Расчет пространственных координат БПЛА (X, Y, Z) основан на решении системы из трех уравнений:

$$X^2 - 2Xx_0 + x_0^2 + Y^2 - 2Yy_0 + y_0^2 + Z^2 = SO^2$$

$$X^2 - 2Xx_A + x_A^2 + Y^2 - 2Yy_A + y_A^2 + Z^2 = SA^2$$

$$Z = h$$

Координаты точек (в метрах):

$$x_A = 3,48728 \text{ мм} = 0,00348278 \text{ м};$$

$$y_A = 8,35879 \text{ мм} = 0,00835879 \text{ м};$$

$$x_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м};$$

$$y_0 = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м};$$

и длины рёбер SA и гипотенузы, рассчитанные выше:

$$SA = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

$$SO = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

Система уравнений в метрах:

$$\begin{cases} (X - 0,00348278)^2 + (Y - 0,00835879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,32858387744396^2 \\ (X - 0,014)^2 + (Y - 0,016)^2 + (Z - 0)^2 = 36,325105233826896^2 \\ Z = h = 35 \end{cases}$$

Решение системы в *MATHCAD* дает следующие координаты:

$$\begin{cases} X = 7,6459904232183711878 \text{ м;} \\ Y = 6,0561252418478661332 \text{ м;} \\ Z = 35 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (мм; рад; рад): (36,334; 0,2718; 0,6699).

Аналогично продолжено для величины смещения -2 см (рис. Б.9).

Полученные результаты представлены далее.

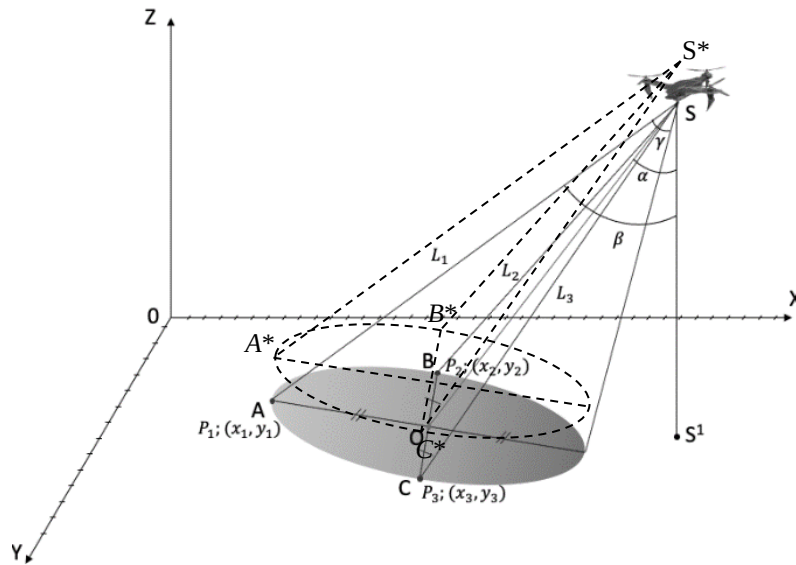


Рисунок Б.9 – Место положения БПЛА, (смещение эллипса по оси Оу на величину 2 см)

Для расчета пространственных координат БПЛА заданы следующие данные:

1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад} = 0,03151267873^\circ$;

2) углы падения луча $\alpha = 0,27094 \text{ рад} = 15,5237185012745^\circ$, $\beta = 0,27128 \text{ рад} = 15,543199066309^\circ$ соответственно между ребром SO и высотой SS^1 конуса, между ребром конуса SA и высотой SS^1 (рис. Б.9)

3) первоначальная высота БПЛА $h = SS^1 = 35 \text{ м}$;

4) координаты диагоналей эллипса (в мм) для точек A, B, C на фотоматрице приемника стационарного пункта в декартовой системе координат:

Координаты точки A (3,48728; 4,35879);

Координаты точки B (8,12215; 20,09017);

Координаты точки C (19,87785; 3,90983).

В сферической системе координат (мм; рад; рад):

Точка A (5,582; 1,5708; 0,896);

Точка B (21,67; 1,5708; 1,1866);

Точка C (20,26; 1,5708; 0,1942).

5) начало координат на ФМ, привязано к координатам места.

Порядок расчета пространственных координат БПЛА после начала работы сети связи.

На фотоматрице оператора БПЛА получают эллиптический след. Используя координаты его диагоналей (в мм) для точек A, B, C , зарегистрированные на фотоматрице приёмника стационарного пункта, можно рассчитать размеры, ориентацию и расположение этого эллипса:

а) $AD = D = 2,6 \text{ см} = 0,026 \text{ м}$ – большая ось эллипса, равная диаметру входной линзы;

б) $BC = d = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ – малая ось эллипса;

в) координат центра эллипса O :

$$x_O = \frac{x_B + x_C}{2} = \frac{8,12215 + 19,87785}{2} = 14 \text{ мм};$$

$$y_O = \frac{y_B + y_C}{2} = \frac{20,09017 + 3,90983}{2} = 12 \text{ мм}.$$

Длины оптической оси (гипотенузы SO) и ребра конуса L_1 (SA) остаются неизменными.

Расчет длин SO и SA :

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SO} \Rightarrow SO = \frac{SS^1}{\cos \alpha} = \frac{35}{\cos (0,27094)} = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

$$\cos \alpha = \frac{SS^1}{SA} \Rightarrow SA = \frac{SS^1}{\cos \beta} = \frac{35}{\cos (0,27128)} = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

Расчет пространственных координат БПЛА (X, Y, Z) основан на решении системы из трех уравнений:

$$X^2 - 2Xx_0 + x_0^2 + Y^2 - 2Yy_0 + y_0^2 + Z^2 = SO^2 \quad (1)$$

$$X^2 - 2Xx_A + x_A^2 + Y^2 - 2Yy_A + y_A^2 + Z^2 = SA^2 \quad (2)$$

$$Z = h \quad (3)$$

Координаты точек (в метрах):

$$x_A = 3,48728 \text{ мм} = 0,00348278 \text{ м;}$$

$$y_A = 4,35879 \text{ мм} = 0,00435879 \text{ м;}$$

$$x_0 = 14 \text{ мм} = 0,014 \text{ м;}$$

$$y_0 = 12 \text{ мм} = 0,012 \text{ м;}$$

и длины рёбер SA и гипотенузы, рассчитанные выше:

$$SA = 36,32858387744396 \text{ м.}$$

$$SO = 36,325105233826896 \text{ м.}$$

Система уравнений в метрах:

$$\begin{cases} (X - 0,00348278)^2 + (Y - 0,00435879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,32858387744396^2 \\ (X - 0,014)^2 + (Y - 0,012)^2 + (Z - 0)^2 = 36,325105233826896^2 \\ Z = h = 35 \end{cases}$$

Решение системы в *MATHCAD* дает следующие координаты:

$$\begin{cases} X = 7,6459904232183711878 \text{ м;} \\ Y = 6,0161252418478661332 \text{ м;} \\ Z = 35 \text{ м.} \end{cases}$$

В сферической системе координат (мм; рад; рад): (36,33; 0,27113; 0,6667).

Таблица Б.2 - Пример расчета координат по геометрии для рассмотренных выше нескольких случаев

Варианты	Координаты (в м)		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
При инсталляции системы	7,6459904	6,0361252	35
«след» увеличен в 1,44 раза	8,2651816	8,4885171	41,9547336
«след» уменьшен в 0,81 раза	6,2023788	6,3698933	31,4660505
«след» смещен вправо на 2 <i>см</i>	7,6659904	6,0361252	35
«след» смещен влево на 2 <i>см</i>	7,6259904	6,0361252	35
«след» смещен по оу 2 <i>см</i>	7,6459904	6,0561252	35
«след» смещен по оу -2 <i>см</i>	7,6459904	6,0161252	35

ПРИЛОЖЕНИЕ В
РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ БПЛА НА ОСНОВАНИИ
УРАВНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

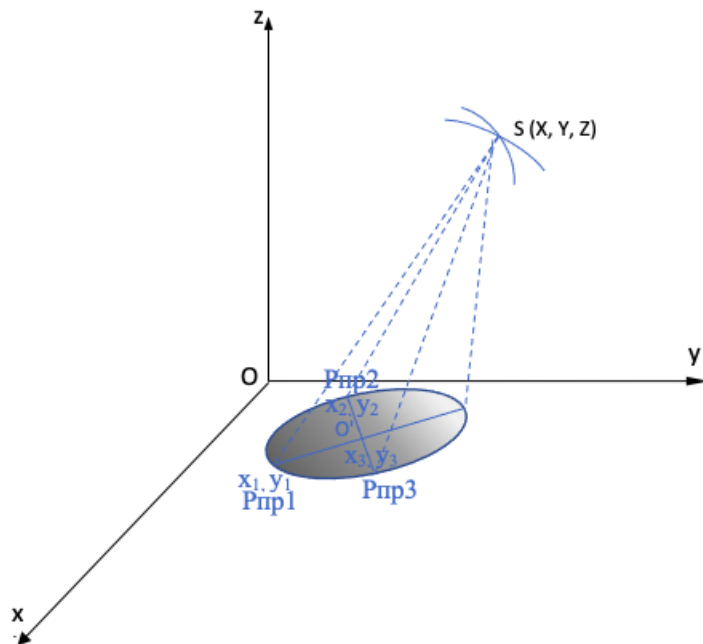


Рисунок В.1 - Наклонный конус. Положение БПЛА в координатной системе

Для расчета требуются следующие исходные данные:

1) угол расхождения лазерного луча передатчика БПЛА $\gamma = 0,55 \text{ мрад} = 0,00055 \text{ рад}$;

2) мощность оптического сигнала:

а) мощность передатчика $P_{\text{пер}} = 33 \text{ дБм}$;

б) мощность излучения на входе приемника:

в точке А: $P_{\text{пр1}} = 18,764808735 \text{ дБм}$;

в точке В: $P_{\text{пр2}} = 18,764821195 \text{ дБм}$;

в точке С: $P_{\text{пр3}} = 18,764821195 \text{ дБм}$.

3) величина затухания света в атмосфере для выбранной местности и потерь в линзах приемо-передающих устройств АОС:

Выберем среднее удельное затухание сигнала в атмосфере W для ясной погоды:

$$W_{\text{ясн}} = 1,5 \frac{\text{дБм}}{\text{км}} = 0,0015 \text{ дБм/м}$$

4) размеры и ориентация эллипса в виде «следа» на ФМ приемника оператора БПЛА (т.е. координаты и значение величин заряда на пикселях ФМ трех точек ($P_{\text{пр}1,2,3}$) на диагоналях эллипса («следе» на ФМ от конуса света):

Координаты точки A (3,48728; 6,35879);

Координаты точки B (8,12215; 22,09017);

Координаты точки C (19,87785; 5,90983).

5) реперная точка или начало координат на планшете оператора БПЛА.

На основании исходных данных и величины потерянной мощности света в процессе распространения в атмосфере рассчитываются длины ребер конуса. Для получения длины ребер конуса используется уравнение оптического баланса, учитывающего потери в атмосфере на рассеяние и поглощение, оптические потери в оптических системах модемов (линзы):

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} = P_{\text{опт}} + P_{\text{атм}} + P_{\text{ппр}}, \quad (\text{В.1})$$

где $P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}$ – энергетический баланс оптического канала (дБм); $P_{\text{пер}}$ – уровень мощности излучения передатчика и $P_{\text{пр}}$ – уровень мощности излучения на входе приёмника. Параметр передатчика $P_{\text{пер}}$ является исходным данным. Параметр приёмника $P_{\text{пр}}$ является из измеряемом, это зависит от значения величины заряда на пикселях фотоматриц самой яркой точки на «следе» от конуса света;

$P_{\text{опт}}$ – потери оптического согласования;

$P_{\text{атм}}$ – затухание сигнала в атмосфере, потерь в связи с поглощением и рассеиванием сигнала при распространении через атмосферу;

$P_{\text{ппр}}$ – геометрическая потеря, обусловленных расходимостью лазерного луча.

Из всех составляющих только величина $P_{\text{опт}}$ не зависит от расстояния между оптическими блоками и для большинства систем находится в диапазоне от 1 до 2 дБм. В этом расчете выбираем $P_{\text{опт}} = 1$ дБм. Две остальные величины, кроме прямой зависимости от расстояния, зависят от телесного угла, в котором распространяется поток, размера линзы приемника (для $P_{\text{ппр}}$), и от физических характеристик атмосферы (для $P_{\text{атм}}$).

В первом приближении $P_{\text{ппр}}$ можно определить как соотношение площади пятна от луча на стороне приемника к площади линзы этого приемника, т.е. эта величина постоянная для каждой конкретной дистанции:

$$P_{\text{ппр}} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right) \quad \text{дБ} \quad (\text{B.2})$$

$$P_{\text{ппр}} = 10 \lg \left(\frac{4 \cdot D \cdot d}{0,01 \cdot 0,01} \right) = 10 \lg \left(\frac{4 \cdot 0,02 \cdot 0,026}{0,01 \cdot 0,01} \right) = 13,18063335 \text{ дБ}$$

Для каждой из трех точек (А, В, С) на ФМ, соответствующих ребрам L_1 , L_2 , L_3 составляется уравнение оптического баланса. Расстояния ребрам L_1 , L_2 , L_3 могут быть рассчитаны следующим образом:

$$L_1 = \frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр1}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}}}{W} = \frac{33 - 18,764808735 - 13,18063335 - 1}{0,0015} = 36,37194358158998 \text{ м}; \quad (\text{B.3})$$

$$L_2 = \frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр2}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}}}{W} = \frac{33 - 18,764821195 - 13,18063335 - 1}{0,0015} = 36,36363691492287 \text{ м}; \quad (\text{B.4})$$

$$L_3 = \frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр3}} - P_{\text{опт}} - P_{\text{ппр}}}{W} = \frac{33 - 18,764821195 - 13,18063335 - 1}{0,0015} = 36,36363691492287 \text{ м}; \quad (\text{B.5})$$

Зададим координаты (в мм) для точек и отметим их на фотоматрице в системе координат:

Координаты точки А (3,48728; 6,35879);

Координаты точки В (8,12215; 22,09017);

Координаты точки С (19,87785; 5,90983).

Для упрощения расчета, переведем все в м:

$$x_1 = 3,48728 \text{ мм} = 0,00348278 \text{ м};$$

$$x_2 = 8,12215 \text{ мм} = 0,00812215 \text{ м};$$

$$x_3 = 19,87785 \text{ мм} = 0,01987785 \text{ м};$$

$$y_1 = 6,35879 \text{ мм} = 0,00635879 \text{ м};$$

$$y_2 = 22,09017 \text{ мм} = 0,02209017 \text{ м};$$

$$y_3 = 5,90983 \text{ мм} = 0,00590983 \text{ м}.$$

$$\begin{cases} (X - 0,00348278)^2 + (Y - 0,00635879)^2 + (Z - 0)^2 = 36,37194358158998^2 \\ (X - 0,00812215)^2 + (Y - 0,02209017)^2 + (Z - 0)^2 = 36,36363691492287^2 \\ (X - 0,01987785)^2 + (Y - 0,00590983)^2 + (Z - 0)^2 = 36,36363691492287^2 \end{cases}$$

После расчетов в *MATHCAD*, мы получим следующие координаты:

$$\begin{cases} X = 18,811861502096226316 \text{ м} \\ Y = 13,671439859742910699 \text{ м} \\ Z = 27,971927518601026382 \text{ м} \end{cases}$$

Сравнение пространственных координат БПЛА, полученные двумя способами, координаты отличается друг от друга в третьем знаке после запятой.

Таблица В.1 - Сравнение пространственных координат БПЛА, полученные двумя способами

Результаты (м)	По проективной геометрии	На основании уравнения оптического баланса
L_1	36,371943445832547357	36,37194358158998
L_2	36,36363682113267	36,36363691492287
L_3	36,36363682113267	36,36363691492287
X	18,811764567517942599	18,811861502096226316
Y	13,671369432680072101	13,671439859742910699
Z	27,972026926263359858	27,971927518601026382

Полученные результаты расчетов пространственных координат БПЛА свидетельствуют о том, что данные алгоритмы расчетов позволяют реализовать систему двустороннего оптического беспроводного канала связи с беспилотным летательным аппаратом при условии неизменности затухания АОС.

ПРИЛОЖЕНИЯ Г
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХРЕШЕТОК
(СВР)

Текст программа Delphi:

```

unit MainForm;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, math;
type
  TfmMain = class(TForm)
    leM0: TLabeledEdit;
    leH: TLabeledEdit;
    leV: TLabeledEdit;
    leE: TLabeledEdit;
    btDraw: TButton;
    leCnt: TLabeledEdit;
    pnMain: TPanel;
    pbPlot: TPaintBox;
    leM: TLabeledEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    cbMaterial: TComboBox;
    procedure pbPlotPaint(Sender: TObject);
    procedure btDrawClick(Sender: TObject);
    procedure FormResize(Sender: TObject);
    procedure cbMaterialChange(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  fmMain: TfmMain;
implementation
uses cmplx;
{$R *.dfm}
function UniStrToFloat(Value: string): extended;
var
  OldDecSep: char;
  s : string;
  function ReplaceStr(const S, Srch, Replace: string): string;
  var

```

```

I: Integer;
Source: string;
begin
  Source := S;
  Result := "";
  repeat
    I := Pos(Srch, Source);
    if I > 0 then begin
      Result := Result + Copy(Source, 1, I - 1) + Replace;
      Source := Copy(Source, I + Length(Srch), MaxInt);
    end
    else Result := Result + Source;
  until I <= 0;
end;
begin
  Value := Trim(Value);
  if Value="" then
    begin
      Result:=0;
      Exit;
    end;
  //s := value;
  s := ReplaceStr(Value, ',', '.');
  try
    Result := StrToFloat(s);
  except
    OldDecSep := DecimalSeparator;
    DecimalSeparator := '.';
    try
      Result := StrToFloat(s);
    finally
      DecimalSeparator := OldDecSep;
    end;
  end;
end;
procedure TfmMain.pbPlotPaint(Sender: TObject);
var e,m0,h,V,m,EE,a,b,amin,amax, Emin, Emax, stepa,stepE, tmp: TComplex;
    SegmentCnt, PlotX, PlotY, i,j: integer;
    drawx, drawx1, drawx2, drawx3: boolean;
    draw, draw1, draw2, draw3: boolean;
    XLinesValues: array [1..4] of extended;
    XLinesValuesName: array [1..4] of string;
    YLinesValues: array [1..4] of extended;
    YLinesValuesName: array [1..4] of string;
function Cmplx(x,y: extended): TComplex;

```

```

begin
  Result.x := x;
  Result.y := y;
end;
procedure DrawHorizLine(ValueText: string);
var y: integer;
begin
  with pbPlot.Canvas do
    begin
      y := pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt));
      moveTo (0, y);
      lineTo (pbPlot.Width-1, y);
      pbPlot.Canvas.TextOut(0, pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt))
- 5, ValueText);
    end;
  end;
procedure DrawVertLine(ValueText: string);
var x: integer;
begin
  with pbPlot.Canvas do
    begin
      x := round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt));
      moveTo (x, pbPlot.Height-1);
      lineTo (x, 0);
      pbPlot.Canvas.TextOut(round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt))-10, pbPlot.Height-
15 , ValueText);
    end;
  end;
function k0: TComplex;
var tmp: TComplex;
begin
  tmp := cMul(h, h);
  Result := cMul(TwoComplex, m);
  Result := cMul(Result, e);
  Result := cMul(Result, EE);
  Result := cDiv(Result, tmp);
  Result := cSqrt(Result);
end;
function q: TComplex;
var tmp: TComplex;
begin
  Result := cMul(TwoComplex, m);
  Result := cMul(Result, e);
  tmp := cSub(V, EE);
  Result := cMul(Result, tmp);

```

```

    tmp := cMul(h, h);
    Result := cDiv(Result, tmp);
    Result := cSqrt(Result);
end;
function f1: TComplex;
var t1,t2,t3: TComplex;
    tmp,tmp1: TComplex;
begin
    t1 := q;
    t2 := b;
    t3 := k0;
    Result := cMul(t1, t2);
    Result := cSinh(Result);
    tmp := cMul(t3, a);
    tmp := cSin(tmp);
    Result := cMul(Result, tmp);
    tmp := cMul(t1, t1);
    tmp1 := cMul(t3, t3);
    tmp := cSub(tmp, tmp1);
    Result := cMul(Result, tmp);
    tmp := cMul(TwoComplex, t1);
    tmp := cMul(tmp, t3);
    Result := cDiv(Result, tmp);
    tmp := cMul(t1, t2);
    tmp := cCosh(tmp);
    tmp1 := cMul(t3, a);
    tmp1 := cCos(tmp1);
    tmp := cMul(tmp, tmp1);
    Result := cSum(Result, tmp);
end;
begin
    SegmentCnt := StrToInt(leCnt.Text);
    e := Cmplx(UniStrToFloat(leE.Text), 0);
    m0 := Cmplx(UniStrToFloat(leM0.Text), 0);
    h := Cmplx(UniStrToFloat(leH.Text), 0);
    V := Cmplx(UniStrToFloat(leV.Text), 0);
    m := cMul(Cmplx(UniStrToFloat(leM.Text), 0), m0);
    case cbMaterial.ItemIndex of
        0: begin
            amin := Cmplx(8e-9, 0);
            amax := Cmplx(10e-8, 0);
            Emin := Cmplx(8e-5, 0);
            Emax := Cmplx(10e-4, 0);
            XLinesValues[1] := 2e-4;
            XLinesValuesName[1] := '2e-4';

```

```

XLinesValues[2] := 4e-4;
XLinesValuesName[2] := '4e-4';
XLinesValues[3] := 6e-4;
XLinesValuesName[3] := '6e-4';
XLinesValues[4] := 8e-4;
XLinesValuesName[4] := '8e-4';
YLinesValues[1] := 2e-8;
YLinesValuesName[1] := '2e-8';
YLinesValues[2] := 4e-8;
YLinesValuesName[2] := '4e-8';
YLinesValues[3] := 6e-8;
YLinesValuesName[3] := '6e-8';
YLinesValues[4] := 8e-8;
YLinesValuesName[4] := '8e-8';
end;
1: begin
  amin := Cmplx(8e-10, 0);
  amax := Cmplx(10e-9, 0);
  Emin := Cmplx(8e-2, 0);
  Emax := Cmplx(10e-1, 0);
  XLinesValues[1] := 2e-1;
  XLinesValuesName[1] := '0.2';
  XLinesValues[2] := 4e-1;
  XLinesValuesName[2] := '0.4';
  XLinesValues[3] := 6e-1;
  XLinesValuesName[3] := '0.6';
  XLinesValues[4] := 8e-1;
  XLinesValuesName[4] := '0.8';
  YLinesValues[1] := 2e-9;
  YLinesValuesName[1] := '2e-9';
  YLinesValues[2] := 4e-9;
  YLinesValuesName[2] := '4e-9';
  YLinesValues[3] := 6e-9;
  YLinesValuesName[3] := '6e-9';
  YLinesValues[4] := 8e-9;
  YLinesValuesName[4] := '8e-9';
end;
end;
stepa := Cmplx((amax.x-amin.x)/SegmentCnt, 0);;
stepE := Cmplx((Emax.x-Emin.x)/SegmentCnt, 0);;
a := amin;
drawx:=true;
drawx1:=true;
drawx2:=true;
drawx3:=true;

```

```

for i := 0 to SegmentCnt-1 do
begin
  b := a;
  EE := EMin;
  if (a.x >= YLinesValues[1]) and drawx then
  begin
    drawx := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[1]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[2]) and drawx1 then
  begin
    drawx1 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[2]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[3]) and drawx2 then
  begin
    drawx2 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[3]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[4]) and drawx3 then
  begin
    drawx3 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[4]);
  end;
  draw:=true;
  draw1:=true;
  draw2:=true;
  draw3:=true;
  for j := 0 to SegmentCnt-1 do
  begin
    if (EE.x >= XLinesValues[1]) and draw then
    begin
      draw := false;
      DrawHorizLine(XLinesValuesName[1]);
    end;
    if (EE.x >= XLinesValues[2]) and draw1 then
    begin
      draw1 := false;
      DrawHorizLine(XLinesValuesName[2]);
    end;
    if (EE.x >= XLinesValues[3]) and draw2 then
    begin
      draw2 := false;
      DrawHorizLine(XLinesValuesName[3]);
    end;
  end;
end;

```

```

if (EE.x >= XLinesValues[4]) and draw3 then
begin
  draw3 := false;
  DrawHorizLine(XLinesValuesName[4]);
end;
tmp := f1;
if cAbs(tmp) <= 1 then
begin
  with pbPlot.Canvas do
  begin
    pen.Color := clGray;
    pen.width := 1;
    PlotX := round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt));
    PlotY := pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt));
    moveTo (PlotX, PlotY);
    lineTo (PlotX+1, PlotY+1);
  end;
end;
EE := cSum(EE, stepE);
end;
a := cSum(a, stepa);
end;
with pbPlot.Canvas do
begin
  //рисует границы графика
  pen.Color := clBlack;
  moveTo (0, 0);
  lineTo (pbPlot.Width, 0);
  moveTo (pbPlot.Width-1, 0);
  lineTo (pbPlot.Width-1, pbPlot.Height-1);
  moveTo (pbPlot.Width-1, pbPlot.Height-1);
  lineTo (0, pbPlot.Height-1);
  moveTo (0, pbPlot.Height-1);
  lineTo (0, 0);
end;
end;
procedure TfmMain.btDrawClick(Sender: TObject);
begin
  pbPlot.Repaint;
end;
procedure TfmMain.FormResize(Sender: TObject);
begin
  pbPlot.Repaint;
end;
procedure TfmMain.cbMaterialChange(Sender: TObject);

```

```

begin
case cbMaterial.ItemIndex of
0: begin
leV.Text := '0,3e-3';
leM.Text := '0,5';
end;
1: begin
leV.Text := '0,3';
leM.Text := '0,067';
end;
end;
end;
end.

```

Решение трансцендентного уравнения с помощью численных методов в DELPHI (рис. Г.1 - Г.2):

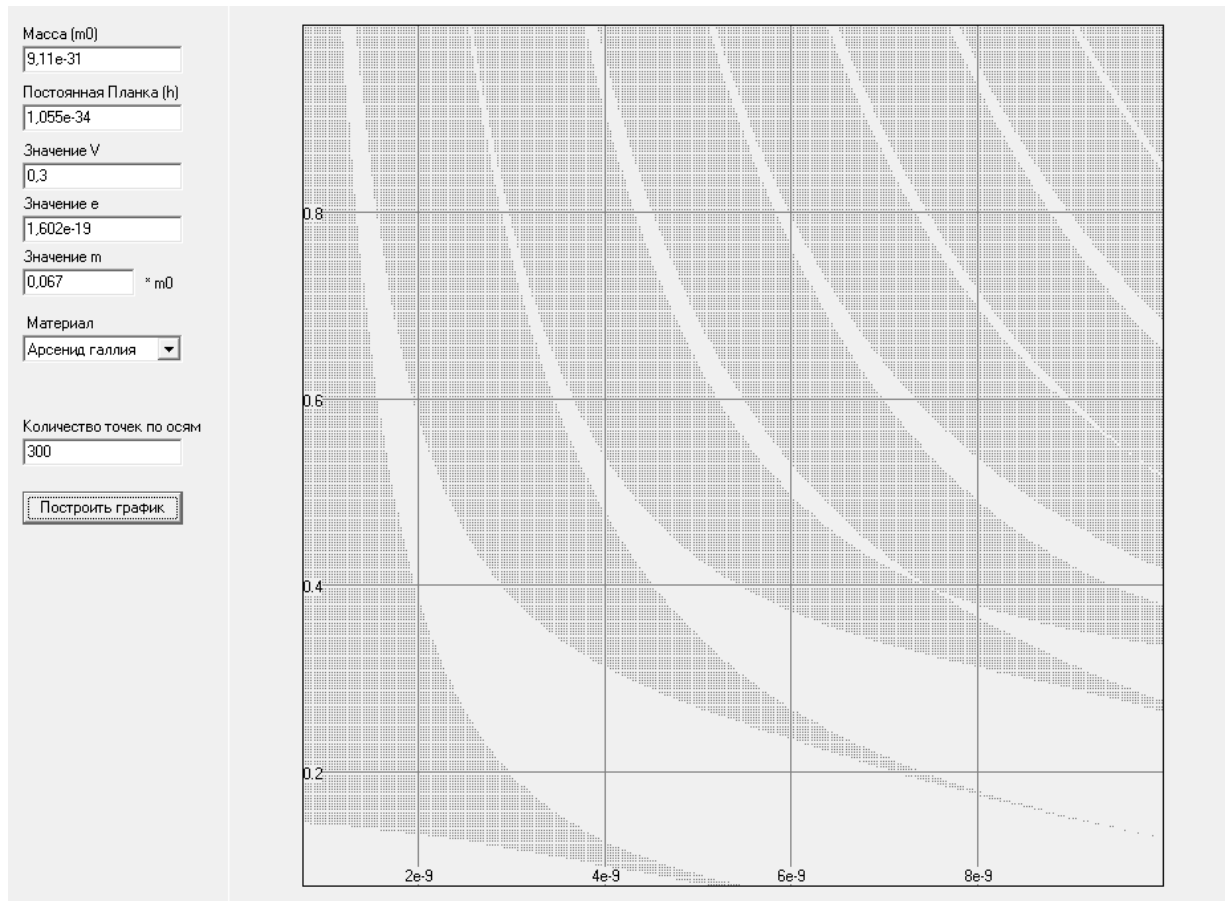


Рисунок Г.1 - Энергетические уровни СВР из арсенида галлия для $x = 0,24$:
а – без очистки от изотопа ^{71}Ga ($m_{\text{эф}} = 0,067m_0$, $V_j = 0,3\text{эВ}$)

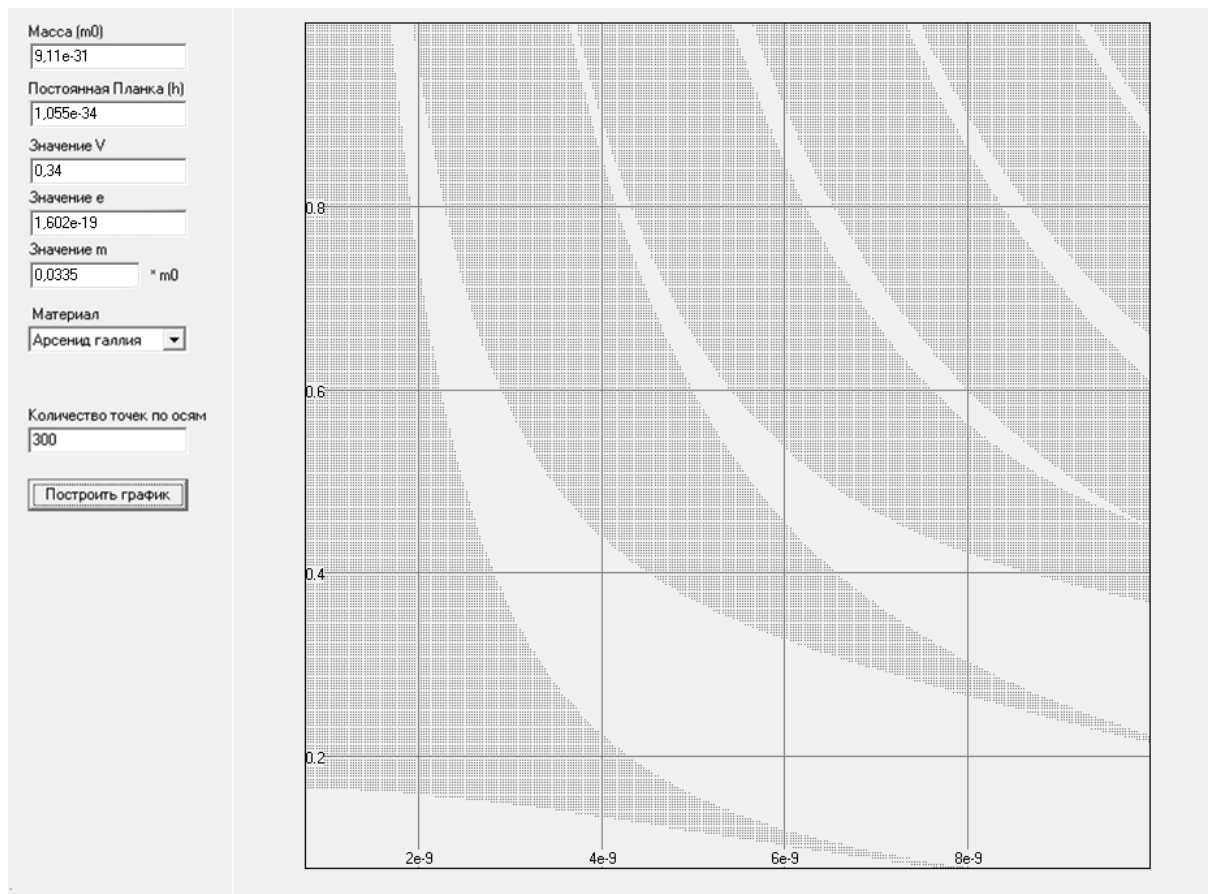


Рисунок Г.2 - Энергетические уровни СВР из арсенида галлия для $x = 0,24$:
 б – с очисткой от ^{71}Ga ($m_{\text{эф}} \cong 0,067m_0/2$, $V_j \cong 0,34\text{эВ}$)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ № 2841515



Рисунок Д.1 - Патент на изобретение № 2841515

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор РУТ (МИИТ)


В.С. Тимонин
« 31 » 08 2026



АКТ

**практического использования результатов
диссертационного исследования**

Результаты научных исследований, проведенных Чыонг Динь Хоп при выполнении диссертации на тему «Разработка методов организации атмосферных оптических каналов связи с беспилотными летательными аппаратами» по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены и используются в учебном процессе по дисциплине «Каналообразующие устройства телекоммуникационных устройств и систем».

И.о. директора
Института транспортной техники
и систем управления,
к.т.н., доцент



Е.С. Максимова

Заведующий кафедрой
«Автоматика, телемеханика
и связь на железнодорожном
транспорте»,
к.т.н., доцент



А.А. Антонов

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

CHỨNG NHẬN SỬ DỤNG KẾT QUẢ LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Tên đề tài: Phát triển phương pháp liên lạc với máy bay không người lái dựa trên các kênh quang không dây.

Nghiên cứu sinh: Trương Đình Hợp.

Giáo sư hướng dẫn: GS. TSKH. Lyubov Mikhailovna Zhuravleva.

Chuyên ngành: Hệ thống, mạng và thiết bị viễn thông (Mã số: 2.2.15).

Chúng tôi xác nhận rằng kết quả nghiên cứu từ luận án của NCS Trương Đình Hợp đã được Cục đường sắt Việt Nam tiếp nhận, đánh giá cao và ứng dụng vào các dự án nghiên cứu, phát triển công nghệ UAV của Cục. Cụ thể, luận án đã có những đóng góp quan trọng sau:

1. Cung cấp giải pháp liên lạc quang không dây cho UAV trong cả hai điều kiện có và không có tín hiệu vệ tinh dẫn đường, giúp nâng cao khả năng ứng dụng UAV trong môi trường phức tạp, ví dụ: nghiên cứu ứng dụng sử dụng UAV tiếp sóng internet cho đoàn tàu Bắc Nam.
2. Phát triển thuật toán kết hợp thị giác máy tính và trí tuệ nhân tạo để nhận dạng và khôi phục hình chiếu quang học, từ đó tính toán tọa độ UAV một cách chính xác ngay cả khi không có tín hiệu GPS/Glonass.
3. Đề xuất thiết kế hệ thống anten pha quang (OFAR), mở ra hướng phát triển hệ thống định hướng chùm tia linh hoạt, không sử dụng cơ cấu cơ khí.
4. Nghiên cứu ứng dụng vật liệu nano và công nghệ làm giàu đồng vị vào linh kiện quang điện tử, góp phần nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống truyền thông quang.

5. Cung cấp cơ sở lý thuyết và phương pháp luận để thiết kế kênh liên lạc an toàn, tốc độ cao cho UAV, phù hợp với định hướng phát triển sản phẩm công nghệ cao của Cục.

Cục Đường sắt Việt Nam trân trọng ghi nhận những đóng góp khoa học và thực tiễn từ luận án của NCS **Trương Đình Hợp**. Kết quả nghiên cứu này đã và đang hỗ trợ Cục trong đánh giá các dự án nghiên cứu, ứng dụng máy bay không người lái, góp phần thúc đẩy sự phát triển công nghệ tiên tiến trong lĩnh vực thông tin tín hiệu đường sắt Việt Nam.

Hà Nội, ngày 09 tháng 6 năm 2026

Cục Đường sắt Việt Nam

Phó Cục trưởng



Đương Hồng Anh

Перевод с вьетнамского языка на русский язык

СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ

Независимость - Свобода - Счастье

**АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Тема: Разработка методов организации атмосферных оптических каналов связи с беспилотными летательными аппаратами.

Аспирант: Чьонг Динь Хоп

Научный руководитель: д.т.н., проф. Журавлева Любовь Михайловна.

Специальность: Системы, сети и устройства телекоммуникаций (Код: 2.2.15).

Мы подтверждаем, что результаты исследования из диссертации аспиранта Чьонг Динь Хопа были рассмотрены и высоко оценены Управлением железных дорог Вьетнама и на начальном этапе прошли опытную эксплуатацию, а также были внедрены в проекты Управления по исследованию и разработке технологий БПЛА. В частности, в диссертации сделаны следующие важные научные и практические вклады:

1. Предоставлено решение для атмосферной оптической связи для БПЛА как при наличии, так и при отсутствии сигналов навигационных спутников. Это способствует расширению возможностей применения БПЛА в сложных условиях. Например: исследование применения БПЛА для ретрансляции интернета для поездов, следующих по маршруту Север-Юг Вьетнама.
2. Разработан алгоритм, объединяющий компьютерное зрение и искусственная нейросеть для распознавания и восстановления проекции эллипса на фотоматрице. Это позволяет точно вычислять координаты БПЛА даже при отсутствии сигнала GPS/ГЛОНАСС.
3. Предложена конструкция оптической фазированной антенной решетки (ОФАР), что открывает перспективы развития систем гибкого управления лучом без использования механических приводов.
4. Исследовано применение наноматериалов и технологий изотопного обогащения в оптоэлектронике. Данный подход способствует повышению эффективности и надежности систем атмосферной оптической связи.
5. Представлена теоретическая база и методология проектирования защищенного высокоскоростного канала связи для БПЛА. Это в полной мере соответствует направлению Управления по разработке высокотехнологичной оборудования.

Управление железных дорог Вьетнама с уважением отмечает научный и практический вклад диссертации аспиранта **Чьонг Динь Хоп**. Результаты этого исследования уже помогают Управлению в оценке проектов по исследованию и применению беспилотных летательных аппаратов. Они также вносят весомый вклад в продвижение передовых технологий в сфере железнодорожной связи и сигнализации Вьетнама.

Ханой, 09 июня 2026 г.

Управление железных дорог Вьетнама

Заместитель начальника Управления

/подпись/

Зыонг Хонг Ань

/Печать: СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА ВЬЕТНАМ *
МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА * УПРАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГ ВЬЕТНАМА/

Перевод данного текста сделан мной, переводчиком Протопоповой Екатериной Михайловной.

Протопопова

Екатерина

Михайловна

Лист



Российская Федерация

Город Москва

Шестнадцатого июня две тысячи двадцать шестого года

Я, Авдеев Вячеслав Владимирович, нотариус города Москвы, свидетельствую подлинность подписи переводчика Протопоповой Екатерины Михайловны.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 77/2212-н/77-2026- 3 -1885

Уплачено за совершение нотариального действия: 400 руб. 00 коп.



В.В. Авдеев

Всего прошнуровано, пронумеровано и скреплено печатью 4 (*четыре*) листа/ов.

Нотариус:

[Signature]

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI HÀ NỘI
KHOA ĐIỆN - ĐIỆN TỬ

GIẤY CHỨNG NHẬN

Về việc Ứng dụng kết quả nghiên cứu luận án Tiến sĩ của NCS Trương Đình Hợp

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải xác nhận đã tiếp nhận và triển khai ứng dụng các kết quả nghiên cứu từ luận án “*Phát triển và nghiên cứu hệ thống liên lạc với các vật thể không người lái (UAV) dựa trên các kênh quang không dây*” do Nghiên cứu sinh Trương Đình Hợp thực hiện tại Đại học Giao thông vận tải Liên bang Nga (RUT (MIIT)). Cụ thể, các đóng góp của Luận án đã được áp dụng như dưới đây.

1. Trong công tác nghiên cứu khoa học

- Ứng dụng mô hình điều khiển UAV qua kênh quang học FSO không phụ thuộc tín hiệu vệ tinh, được sử dụng là tài liệu tham khảo cốt lõi cho nghiên cứu cấp Trường về mạng lưới cảm biến không dây và giám sát thông minh.

- Thuật toán điều chỉnh quang học ứng dụng học máy (AI) của luận án được ứng dụng trong nội dung nghiên cứu tối ưu nhiều tín hiệu trong mạng viễn thông đô thị.

2. Trong công tác đào tạo và giảng dạy

- Các nền tảng lý thuyết và giải thuật đề xuất trong luận án đã được cập nhật để đưa vào chuyên đề chuyên sâu của một số học phần: Mạng viễn thông, Kỹ thuật mạng nâng ... cao dành cho sinh viên năm cuối và học viên cao học.

- Việc cập nhật những giải pháp công nghệ án này giúp sinh viên, học viên cao học tiếp cận với xu hướng viễn thông thế giới, gợi mở đề tài nghiên cứu tiềm năng.

NCS Trương Đình Hợp đã thể hiện sự nghiêm túc, tư duy khoa học độc lập và khả năng giải quyết các vấn đề kỹ thuật thông qua quá trình trao đổi học thuật với các chuyên gia tại Khoa Điện - Điện tử Trường Đại học Giao thông vận tải.

Hà Nội, ngày 15 tháng 06 năm 2026

Xác nhận của Cơ quan

Xác nhận chữ ký của PGS.TS Trịnh Lương Miên là Phó Trưởng
 Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải



PGS.TS. *Hồ Xuân Nam*

Khoa Điện - Điện tử

Phó Trưởng Khoa

PGS.TS. Trịnh Lương Miên

Перевод с вьетнамского языка на русский язык
ХАНОЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
ФАКУЛЬТЕТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационного исследования аспиранта Чыонг Динь Хопа

Факультет электротехники и электроники Ханойского университета транспорта и коммуникаций подтверждает принятие и внедрение результатов исследований из диссертации на тему *«Разработка методов организации атмосферных оптических каналов связи с беспилотными летательными аппаратами»*, выполненной аспирантом Чыонг Динь Хопом в Российском университете транспорта (РУТ (МИИТ)). В частности, результаты диссертации были применены следующим образом:

1. В научно-исследовательской работе:

Применение модели управления БПЛА через атмосферный оптический канал связи (FSO), не зависящей от спутниковых сигналов, используется в качестве основного справочного материала для исследований университетского уровня в области беспроводных сенсорных сетей и интеллектуального мониторинга.

Алгоритм оптической настройки с применением машинного обучения (ИИ), предложенный в диссертации, применяется в исследованиях по оптимизации сигнальных помех в городских телекоммуникационных сетях.

2. В учебно-образовательном процессе:

Теоретические основы и алгоритмы, предложенные в диссертации, были обновлены и включены в специализированные темы следующих учебных дисциплин: «Телекоммуникационные сети» и «Передовые сетевые технологии» для студентов и магистрантов.

Внедрение данных технологических решений из диссертации помогает студентам и магистрантам ознакомиться с мировыми тенденциями в сфере телекоммуникаций и открывает потенциальные темы для исследований.

В процессе научных дискуссий со специалистами Факультета электротехники и электроники Ханойского университета транспорта и коммуникаций аспирант Чыонг Динь Хоп продемонстрировал серьезный подход, независимое научное мышление и способность решать технические задачи.

Подтверждение учреждения

Ханой, 15 июня 2026 г.

ПО ПОРУЧЕНИЮ РЕКТОРА

**Заместитель декана Факультета
электротехники и электроники**
(Подпись, печать)

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ОРГАНИЗАЦИИ И КАДРОВ

Доцент, д-р Чинь Лыонг Миен

(подписан)

к.т.н., доцент Хо Суан Нам

Печать: Министерство образования и подготовки кадров

* Университет транспорта и коммуникаций

Перевод данного текста выполнен мной, переводчиком Шашаевым Александром Андреевичем, верность перевода подтверждаю.

Переводчик

Шашаев Александр Андреевич



Российская Федерация

Город Москва

Первого сентября две тысячи двадцать шестого года.

Я, Бакулина Юлия Николаевна, нотариус города Москвы, свидетельствую подлинность подписи переводчика Шашаева Александра Андреевича.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 77/1794-н/77-2026- 12-3552

Уплачено за совершение нотариального действия: 400 руб. 00 коп.



Ю.Н. Бакулина

Ю.Н. Бакулина

Всего прошнуровано, пронумеровано,
и скреплено печатью -3- листа(ов)

Нотариус

Ю.Н. Бакулина

Ю.Н. Бакулина