



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра Информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Бакалавр)

На тему «**Оптический канал связи для морских информационных
систем**»

Исполнитель

Сорокин Павел Алексеевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Кандидат военных наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Юрин Игорь Валентинович

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(Подпись)

Доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич

(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Санкт-
Петербург
2025 год

Оглавление

Перечень сокращений.....	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Формулирование цели и задач.....	7
Актуальность.....	8
1 ГЛАВА ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА КОРАБЛЕ	9
1.1 Историческая справка.....	9
1.2 Определение понятия «Оптический канал связи»	10
1.3 Компоненты системы	10
1.4 Принцип работы.....	11
1.5 Перечень популярных моделей и их характеристик.....	13
2 ГЛАВА СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ С РАДИОСВЯЗЬЮ.....	15
2.1 Сравнительный анализ	15
2.2 Анализ реального исследования	17
2.3 Анализ методов стабилизации и сопровождения луча.....	27
2.4 Подведение итогов анализа оптического канала связи на корабле.....	30
3 ГЛАВА РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА КОРАБЛЕ	31
3.1 Дуплексная система FSO	31
3.2 Разработка прототипа	35
3.3 Создание модели системы в Wokwi.....	40
3.4 Проверка работоспособности системы.....	43
3.5 Блок схема для кода на Python	45
3.6 Перспективы улучшения прототипа.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	52

Перечень сокращений

FSO - Free Space Optics – Оптика свободного пространства

АЛС – Атмосферная лазерная связь

ИК - инфракрасный

УКВ - ультракороткие волны

5G – радиоэлектронная связь пятого поколения

GPS - Global Positioning System - американская система глобального позиционирования

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

ВВЕДЕНИЕ

Современный флот — военные корабли, подводные аппараты, речные и морские суда — нуждается в скоростных и безопасных каналах связи для обмена критически важными данными. К ним относятся навигационные сведения, телеметрия, сигналы управления и видео в реальном времени. Несмотря на проверенную надежность и дальность радиосвязи, она имеет существенные недостатки: уязвимость к помехам, риск перехвата информации и низкую пропускную способность. Эти ограничения стимулируют развитие альтернативных решений, среди которых лидируют лазерные системы, обеспечивающие высокую скорость и защищенность передачи данных.

В России оптические технологии пока не получили массового распространения на флоте. Их применение сосредоточено в военно-морской сфере и экспериментальных гражданских проектах. Ключевыми барьерами для внедрения остаются технические сложности, зависимость от погодных условий и высокая стоимость инфраструктуры.

Отечественные корабли, на которых устанавливались системы оптической связи:

1. Фрегаты проекта 22350 («Адмирал Горшков» - рисунок 1, «Адмирал Касатонов»)



Рисунок 1

Устанавливались экспериментальные устройства позволяющие наладить лазерные каналы связи («Светокод», ООО "Светокод"). Оно выполняет функцию резервной связи при РЭБ (радиоэлектронной борьбе).

2. Малые ракетные корабли проекта 21631 («Буян-М») -
рисунок 2



Рисунок 2

На малых ракетных кораблях проекта 21631 присутствует возможность оснащения лазерными каналами для связи с БПЛА и береговыми пунктами.

3. Ледоколы («Арктика» - рисунок 3, «Сибирь»)



Рисунок 3

Оптическая связь тестировалась для передачи данных в условиях Арктики, где радиосигналы неустойчивы.

4. Научно-исследовательские суда (например, «Академик Мстислав Келдыш» - рисунок 4)



Рисунок 4

С помощью установки, обеспечивающей оптический канал передачи данных (лазерные модемы), производится связь с глубоководными аппаратами («Мир», «Витязь»)

5. Беспилотные катера (проекты ЦНИИ «Курс»)

Лазерные системы используются для управления в зоне прямой видимости.

Формулирование цели и задач

Целью данного дипломного проекта является исследование принципов построения оптических каналов связи на кораблях и разработка рекомендаций по их совершенствованию. В рамках работы необходимо рассмотреть и решить следующие задачи:

1. Исследовать физические основы оптической связи в морских условиях. Включая, методы стабилизации и сопровождения луча.
2. Провести сравнительный анализ с традиционными радиосистемами.
3. На основе сравнительного анализа, составить рекомендации по совершенствованию систем оптического канала связи на судах.

Структура выпускной квалификационной работы включает введение, три содержательные главы, заключение и список использованных источников. Все элементы логически взаимосвязаны и последовательно раскрывают её тему.

В первой главе проводится исследование объекта дипломной работы - оптического канала связи, его характеристик и принципа работы.

Во второй главе описан сравнительный анализ оптического канала связи на корабле с традиционными методами связи.

Третья глава включает в себя разработку прототипа устройства, способного решить проблемы и минимизировать недостатки, обнаруженные во второй главе у оптической связи.

В заключении представлены итоги исследования и основные выводы

Актуальность

Актуальность выбранной темы заключается в растущем требовании современных судов к сверхбыстрой, защищенной и стабильной связи. Это связано с необходимостью передачи крупных массивов данных: телеметрии, видео высокого разрешения, информации со спутниковой разведки, а также управления беспилотными системами с соблюдением строгой конфиденциальности. Традиционные радиочастотные каналы уже не справляются с требованиями к пропускной способности и защите от перехвата. В таких условиях оптическая связь на кораблях становится стратегически важным решением, чья актуальность будет только возрастать на фоне геополитической нестабильности.

1 ГЛАВА ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА КОРАБЛЕ

1.1 Историческая справка

Первые в СССР атмосферные линии связи появились в 1960-х годах. В Москве была развернута телефонная линия между зданием МГУ на Ленинских горах и Зубовской площадью протяженностью свыше 5 км, а в Тбилиси - телевизионная АЛС длиной 3,5 км, соединявшая студийный комплекс с передатчиком. Качество передачи в этих системах полностью соответствовало стандартам Международного консультативного комитета по радио. Аналогичные успешные эксперименты проводились в Ленинграде, Горьком и Ереване.

Техническая реализация первых АЛС основывалась на гелий-неоновых лазерах ЛГ-36 с длиной волны 0,63 мкм и мощностью излучения 40 мВт. Для модуляции сигнала использовались устройства на эффекте Поккельса (модуляторы ОПМШ-100), а в качестве фотоприемников применялись фотоумножители ФЭУ-51. Однако неустойчивость к атмосферным помехам, таким как снег, дождь и туман привела к тому, что в тот период технология была признана малоперспективной.

Новый этап развития оптической связи начался в 1998 году с появлением доступных полупроводниковых лазеров мощностью от 100 мВт. Этот технологический прорыв совпал с бурным ростом спроса на информационные услуги - интернет-доступ, IP-телефонию, многоканальное телевидение и компьютерные сети. Остро встала проблема "последней мили" - организации высокоскоростного подключения конечных пользователей.

Традиционные кабельные решения требовали значительных инвестиций и часто оказывались труднореализуемыми в условиях плотной городской застройки. В этой ситуации беспроводные технологии стали оптимальным решением.

1.2 Определение понятия «Оптический канал связи»

Оптическая связь – технология передачи цифровых данных с помощью света (лазерного, светодиодного или инфракрасного излучения). По видам технология различается в среде передачи луча – оптоволоконный кабель или свободно-оптическая среда. Например, атмосфера или вода. В данной дипломной работе рассматривается передача информации между кораблем и внешней целью в свободно-оптической среде, что в свою очередь и является оптическим каналом связи на корабле. Передача данных с помощью FSO канала связи может быть налажена между кораблями, береговыми станциями и даже подводными аппаратами. Стоит отметить, что использование кабельной и подводной оптической связи достаточно нерентабельно в данных условиях.

1.3 Компоненты системы

Компоненты системы, обеспечивающей оптическую связь на корабле:

1. Передающий модуль

- Лазерный излучатель (зачастую полупроводниковый лазер).
- Модуль аналого-цифрового преобразователя преобразует электрический сигнал в световые импульсы.
- Оптическая система линзы, зеркала.
- Система стабилизации и наведения - гироскопы, стабилизаторы.

2. Приемный модуль

- Фотодетектор.
- Оптический фильтр.
- Модуль АЦП переводит свет обратно в электрический сигнал.

3. Система управления и обработки данных

- Контроллер связи
- Интерфейс с корабельными сетями (например, Ethernet)

1.4 Принцип работы

1. Установление соединения

Системы на двух кораблях обнаруживают друг друга (через GPS трекер, радиоканал или ИК-маяк). Лазерные передатчики – рисунок 5, наводятся друг на друга с помощью сервоприводов.



Рисунок 5

2. Передача данных

С помощью технологии аналого-цифрового преобразования – рисунок 6 информация кодируется в световом потоке. Высокочастотным включением и отключением лазера формируется несущий необходимую информацию луч.

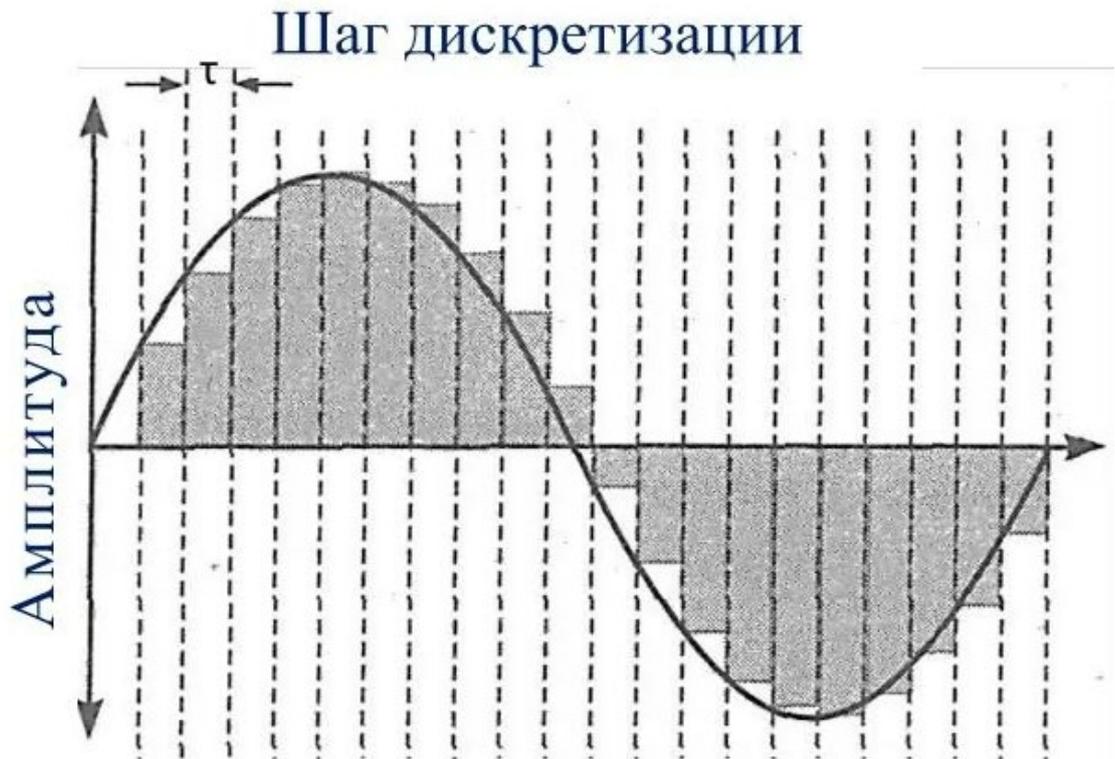


Рисунок 6

3. Прием и обработка

Объектив приёмника собирает рассеянный сигнал, фильтрует помехи (например, солнечный свет, отражения). Сигнал преобразуется в цифровой и передается в корабельную сеть.

4. Стабилизация при качке

Гироскопы – рисунок 7 и следящие системы корректируют луч в реальном времени. Если связь прерывается, система старается восстановить соединение.

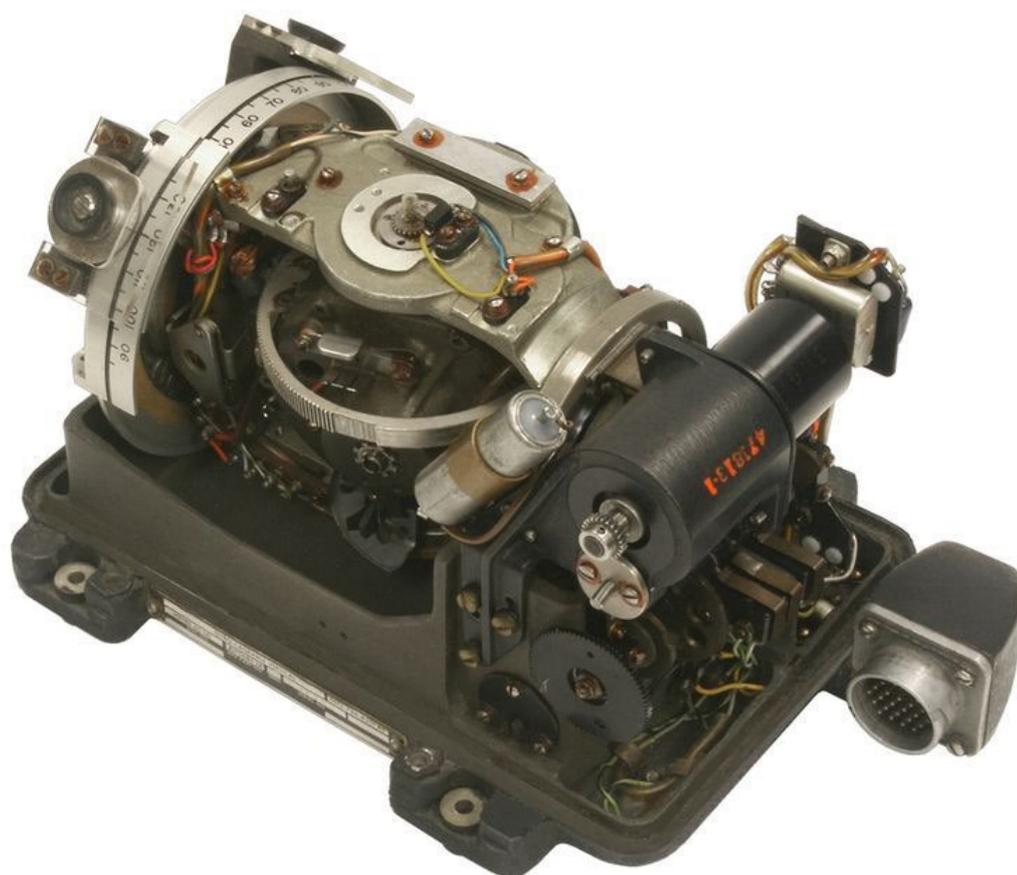


Рисунок 7

1.5 Перечень популярных моделей и их характеристик.

Производитель	Модель	Дальность , Км	Скорость , Гбит/с	Цена , млн. руб	Применение на флоте
НПО «Астрофизика»	ЛКС-М	5	2,5	5	Корабли военного назначения
ОКБ «Фотоника»	ФСО-М	3	1	3	Гражданские суда
НПО «Оптэра»	Оптэра-М	5	2,5	3	
ООО «Светокод»	Светокод FSO	2	1	1	Гражданские и исследовательски е суда
ГК «Росэлектроника »	ИРСЕТ FSO	3	3	3	Гражданские суда
fSONA	SONAbeam 1550	5	1,25	2,8	Корабли военного назначения

Mynaric	CONDOR Mk3	10	10	12	Корабли военного назначения
LightPointe	FlightStrata 550	2,5	1,25	1,6	Гражданские суда
AOptix	Strata	10	10	4	Гражданские суда
Harris Falcon	Trimble	5	1	3	Корабли военного назначения

Таблица 1

На таблице 1 показаны наиболее популярные модели FSO связи и их характеристики.

2 ГЛАВА СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ С РАДИОСВЯЗЬЮ

2.1 Сравнительный анализ

Современные корабли оснащаются различными системами связи. Самыми распространенными из них являются радиосвязь и оптические каналы передачи данных. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют их применимость в морских условиях.

Сравнительный анализ видов связи на корабле, будет проведён по следующим критериям.

- Скорость передачи данных (пропускная способность).
- Устойчивость к электромагнитным помехам (ЭМП).
- Безопасность передачи данных (риск перехвата).
- Энергопотребление.
- Стоимость развертывания и обслуживания.
- Устойчивость к погодным условиям и механическим воздействиям.
- Дальность работы

Рассмотрим технические характеристики оптического канала связи и радиосвязи на корабле, приближенные к реальным условиям.

Скорость передачи данных

У оптической связи пропускная способность может достигать 10 Гбит/с и выше благодаря использованию лазерных технологий. Подходит для передачи больших объемов данных. Учитывая современные технологии такие как, видео наблюдение (высокого качества), техническая информация (например, 3D модель поверхности дна реки), результаты исследований, можно отметить, что такие объемы данных требуют высокоскоростного соединения. Для передачи информации необходима прямая видимость передатчика и приемника.

Рассмотрение подлежит самый скоростной диапазон радиосвязи УКВ.

Скорость УКВ диапазона может достигать 5 Гбит/с. Однако, зачастую скорость передачи данных находится в диапазоне от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с. Для передачи информации отсутствует необходимость в прямой видимости, сигнал может доходить до приёмника, отражаясь от неоднородностей в тропосфере или связываясь со спутником.

Устойчивость к электромагнитным помехам (ЭМП).

Оптическая связь совершенно не подвержена электромагнитным помехам, за счёт своего принципа работы. Электромагнитное излучение не может влиять на свет – инструмент передачи информации.

Радиосвязь сильно зависит от помех (радары, другие передатчики, солнечная активность, системы РЭБ). Например, РЭБ (радиоэлектронная борьба) системы разрабатывались с целью подавления радиосвязи. Они создают колоссальные помехи, которые в свою очередь мешают работе радиосвязи или полностью глушат ее.

Безопасность передачи данных (риск перехвата)

Оптический канал связи практически невозможно перехватить. Необходимо физическое вмешательство в прямой видимости луча. Радиосвязь отлично подлежит перехвату. Для защиты информации передаваемой радиосвязью требуется шифрование. С увеличением необходимости приватности передаваемой информации растет потребность более продвинутом методе шифрования.

Энергопотребление

FSO не подвержена высокому энергопотреблению. Радиосвязь требует высоких энергозатрат в особенности для мощных передатчиков.

Стоимость развертывания и обслуживания.

Для стабильной и хорошей работы оптического канала связи необходимо дорогое и качественное оборудование. Эксплуатационные расходы невероятно малы, а работы по отстройке достаточно редки. Радиосвязь дешевле в установке, но требует частой настройки. Она определенно дешевле на начальном этапе, но оптическая связь выгоднее в долгосрочной перспективе.

Устойчивость к погодным условиям и механическим воздействиям.

Оптическая связь достаточно сильно зависит от погодных условий. Например, туман, дождь, задымление. Радиосвязь в отличие от оптической устойчива к погодным условиям, но могут наблюдаться проблемы в передаче информации в шторм.

Дальность работы

УКВ диапазон радиосвязи зачастую имеет большую дальность работы, а при наличии ретранслятора может значительно превосходить АЛС по данному параметру.

Проанализировав сильные и слабые стороны оптического канала связи на корабле можно сделать следующий вывод. Оптическая связь является ультимативным решением, для достижения максимальной секретности передаваемой информации, а так же позволяет развивать действительно гигантские скорости передачи данных. Не требует частой настройки. Однако не может являться основным видом связи на корабле, по причине необходимости прямой видимости передатчика и приемника, а так же чувствительностью к погодным условиям.

2.2 Анализ реального исследования

ИНФОРМОСТ- Радиоэлектроника и Телекоммуникации №5(18), 2001, Б. Милинкис, В. Петров.

Система атмосферной оптической связи между двумя пунктами представляла собой два синхронизированных приемопередающих модуля, установленных в зоне прямой видимости на противоположных концах линии связи и ориентированных друг на друга. В передающем модуле располагались ключевые компоненты: лазерный генератор и АЦП модуль, осуществляющий кодирование передаваемого сигнала в оптическое излучение. Модулированный лазерный луч коллимировался оптической системой и направлялся в сторону приемника. В приемнике излучение фокусировалось на фотоприемник, где производилось его детектирование и выделение передаваемой информации. Так как лазерный луч передается между пунктами связи в атмосфере, то его распространение сильно зависит от метеоусловий, от наличия дыма, пыли и других загрязнений воздуха. Кроме того, в атмосфере наблюдались турбулентные явления, которые приводят к флуктуации показателя преломления среды, колебаниям луча и искажениям принимаемого сигнала. Несмотря на перечисленные ограничения, практические испытания подтвердили надежность работы системы на дистанциях до нескольких километров. Наибольший потенциал технология продемонстрировала при решении задачи "последней мили", где традиционные проводные решения оказывались экономически или технически нецелесообразными.

Проблема «последней мили» — это сложность обеспечения высокоскоростного подключения конечных пользователей (домов, офисов, судов и других объектов) к магистральным сетям связи. Название условное: «миля» означает не конкретное расстояние, а финальный участок сети между провайдером и абонентом.

Для обеспечения надежной работы атмосферных линий связи АЛС и качественной передачи данных лазерным излучением критически важно учитывать влияние состояния атмосферы на распространение оптического сигнала. В связи с этим был выполнен ряд фундаментальных исследований процессов распространения лазерного излучения в атмосферных условиях.

При прохождении лазерного излучения через атмосферу наблюдался комплекс взаимосвязанных линейных и нелинейных эффектов взаимодействия света с окружающей средой. Эти явления можно классифицировать на три основные категории:

1. Молекулярное поглощение и рассеяние в газах воздуха.
2. Ослабление излучения аэрозольными частицами (пыль, осадки, туман).
3. Флуктуации сигнала, вызванные атмосферной турбулентностью.

Кратко остановимся на каждом из этих явлений.

Поглощение светового потока видимого и инфракрасного диапазонов определяется, прежде всего, молекулярным поглощением, крайне неравномерным по частоте. Оно максимально на резонансных частотах молекул воздуха, воды, углекислого газа, озона и других компонент атмосферы.

На рисунке 8 представлен спектр поглощения солнечного излучения с низким спектральным разрешением, где наблюдаемые полосы поглощения формируются в результате суперпозиции множества молекулярных переходов.

Важно отметить, спектральные характеристики существенно варьируются в зависимости от региональных атмосферных условий. Области с минимальным поглощением ("окна прозрачности") сохраняют некоторую остаточную поглощательную способность. При повышении спектрального разрешения в этих окнах выявляется сложная структура поглощения.

На рисунке 9 представлен характерный спектральный профиль атмосферного поглощения в окрестности длины волны 0,69 мкм, соответствующей излучению рубинового лазера. Современные исследования позволяют получить точные количественные значения коэффициента поглощения для произвольных спектральных диапазонов. Если длина волны лазера известна, то поглощение его излучения может быть заранее определено для любых реальных условий в атмосфере.

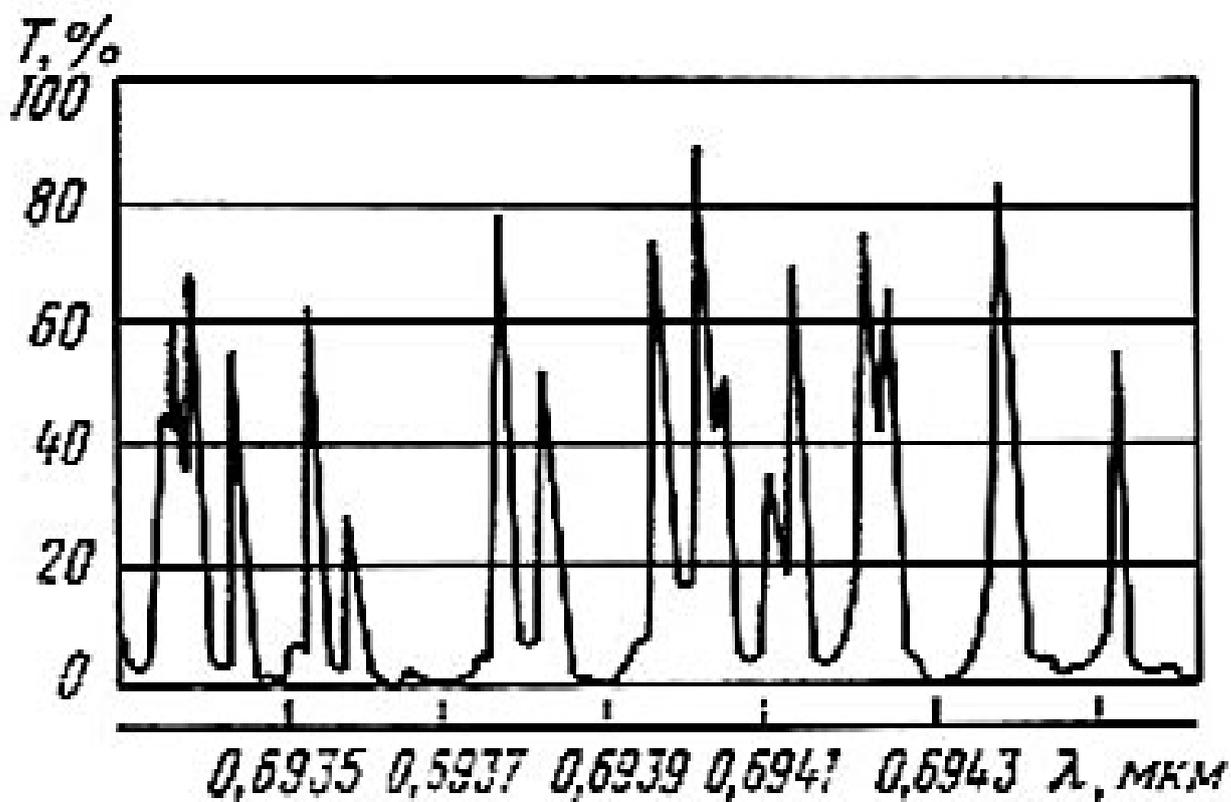


Рисунок 9

Лазерное излучение, попадающее в центр интенсивной спектральной линии, полностью поглощается атмосферой даже на малых дистанциях. По этой причине в авиационных лазерных системах необходимо использовать лазеры, работающие в диапазонах с высокой прозрачностью атмосферы - в широких окнах пропускания или микроокнах между слабыми линиями поглощения. При этом частота излучения должна быть стабилизирована с достаточно высокой точностью, особенно если она находится на близком расстоянии от линии поглощения газов.

Кроме молекулярного поглощения, распространение луча затрудняется молекулярным рассеянием энергии микросгустками молекул воздуха, которые отличаются неодинаковой плотностью и разными коэффициентами преломления. Эти неоднородности в газовой среде крайне неустойчивы и определяются локальными температурными условиями, сезоном, временем суток, а также концентрацией примесей в каждой отдельной микроне атмосферы. Молекулярное рассеяние достаточно хорошо изучено. Составлены обширные таблицы коэффициентов рассеяния в видимой и инфракрасной областях спектра, обеспечивающие достаточно точный количественный расчет потерь энергии излучения на заданном расстоянии.

Атмосфера — это смесь газов, водяного пара, жидких капель и твёрдых частиц. В ней постоянно содержатся пыль, дым и ледяные кристаллы, количество которых меняется. Благодаря этому атмосферу можно считать аэрозолем, чей состав непрерывно изменяется из-за процессов перемешивания.

Когда говорят об аэрозольном рассеянии, обычно подразумевают не только рассеивание света, но и его поглощение частицами аэрозоля, что в совокупности называют аэрозольным ослаблением излучения.

Все типы атмосферных аэрозолей можно объединить в следующие основные классы: облака, туманы, дымки, морозь и осадки - дождь или снег. В облаках и туманах наиболее вероятное значение радиуса частиц составляет 5-6 мкм, а в дымках на 1-2 порядка меньше. Поэтому ослабление микронного излучения в дымках ниже. Результаты измерений прозрачности дымок, туманов и осадков в различных климатических районах изложены в. При этом теоретически и экспериментально показано, что ослабление сигнала при дожде и снегопаде меньше, нежели при тумане (таблица 2).

Погодные условия	Затухание, дБ/км
Ясная погода	0-3
Слабый дождь	3-6

Сильный дождь	6-17
Снег	6-26
Легкий туман	20-30
Густой туман	50-100

Таблица 2

На рисунке 10 приведены кривые ослабления лазерного сигнала в различных аэрозолях по данным Информационно - технологического центра Новосибирска. Зависимость ослабления света в аэрозолях от расстояния при различных метеофакторах.

1 - снег средней плотности (МДВ = 1 км), 2 - сильный дождь (40 мм/час), 3 - снег небольшой плотности (МДВ = 1,5 км), 5 - дымка (МДВ = 2 км), 6 - граничный уровень, 60 дБ



Рисунок 10

На табл. 2 и рис. 10 видно, что главными ограничителями дальности установки являются густой снег и густой туман, для которых аэрозольное ослабление максимально. На распространение лазерного луча сильное влияние оказывает также турбулентность атмосферы, то есть случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха, флуктуациями его температуры и плотности. Поэтому световые волны, распространяющиеся в атмосфере, испытывают не только поглощение, но и флуктуации передаваемой мощности.

Атмосферная турбулентность вызывает искажения волнового фронта, что приводит к флуктуациям и расширению лазерного луча, а также к неравномерному распределению энергии в его поперечном сечении. На приемной антенне это выражается в виде хаотичного чередования темных и светлых пятен с частотой от долей герца до нескольких килогерц. В некоторых случаях возникают замирания сигнала (аналогичные явления наблюдаются в радиосвязи), что снижает стабильность соединения.

Наиболее интенсивные замирания наблюдаются в ясную солнечную погоду, особенно летом в жаркие дни, а также во время восхода и заката солнца при сильном ветре. В качестве примера на рисунке 11 представлены две крайние зависимости вероятности ошибок (BER) от дальности связи для системы АЛС Информационно-технологического центра (Новосибирск) в условиях ясной погоды: одна соответствует сильной турбулентности, другая — слабой. Типичные значения BER располагаются между этими кривыми.

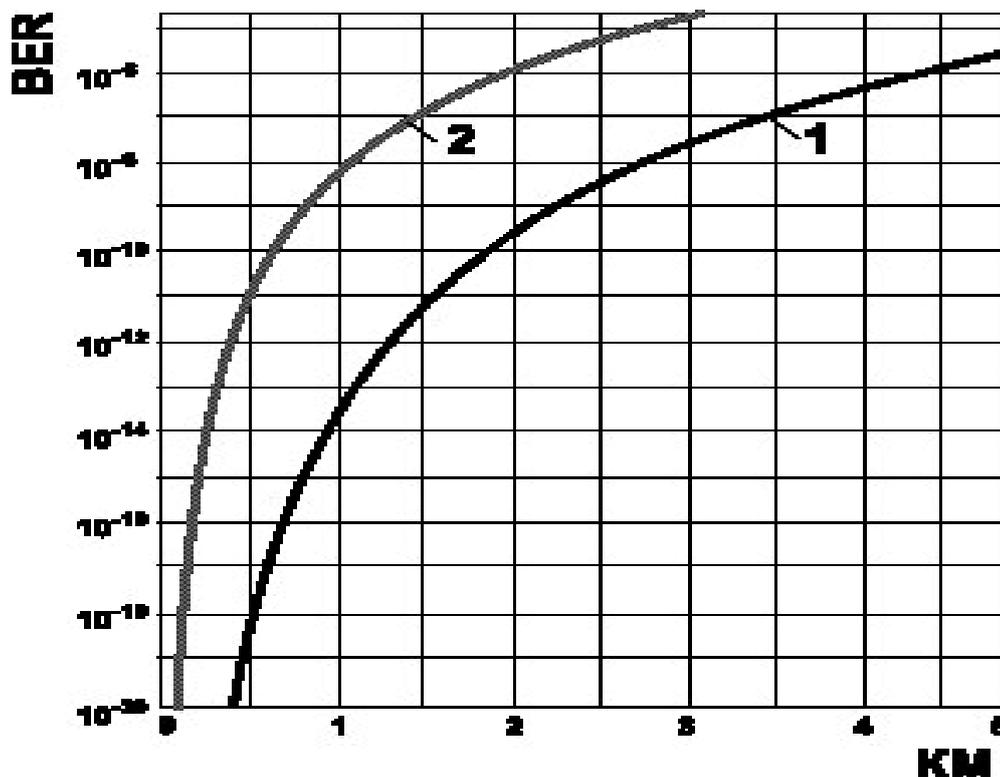


Рисунок 11

Зависимость вероятности ошибок BER от расстояния при слабых замираниях в атмосфере (кривая 1) и сильных замираниях (кривая 2) для АЛС ЛАЛ2+. Дождь, туман, снег, дымка отсутствуют.

Использование лазеров в атмосферных системах связи требует учета совокупного воздействия среды, которая поглощает, рассеивает излучение и обладает неоднородной структурой. Данные факторы могут значительно изменяться, поэтому для поддержания работоспособности АЛС на определенной дистанции с заданной надежностью (или доступностью канала) критически важен достаточный энергетический запас.

Устройство испытательной установки

Лазерная система связи – рисунок 12 включает в себя две одинаковые станции, которые устанавливаются строго друг напротив друга в зоне прямой видимости. Два компьютера, между которым и передавались данные. LAN кабели, и разветвители к ним, тестер интернет соединения.



Рисунок 12

При испытаниях были соблюдены следующие условия:

1. На траектории луча не было никаких помех, включая сезонные изменения (например, провисание проводов летом или при обледенении, появление листвы на деревьях, рост растений, снежные заносы зимой и т. д.)
2. Лазерные установки располагались вдали от источников тепла
3. При ориентации системы по направлению запад - восток были учтены возможные нарушения в работе АЛС в результате засветки приемника при восходе или заходе солнца.

4. Камеры видеонаблюдения не фиксировали наличие птиц мешающих передавать информацию, находящихся в непосредственной близости лазера.

Как уже упоминалось, сбои в работе системы могут возникать из-за неблагоприятных погодных условий, таких как сильный туман или снегопад, а также из-за атмосферной турбулентности, вызывающей замирания сигнала. Важно, что эти факторы проявляются в разное время: замирания обычно наблюдаются в ясную, солнечную погоду, тогда как туман и снегопад исключают их возникновение. Благодаря этому при оценке надежности связи не требуется суммировать ослабление сигнала, вызванное обоими факторами.

Помимо атмосферных потерь, необходимо учитывать и геометрические потери, которые зависят от длины линии связи и угловой расходимости луча. Например, при расходимости излучения 4 мрад, расстоянии 250 м и диаметре приемной линзы 10 см геометрические потери достигают 20 дБ — это означает, что приемник улавливает лишь 1% мощности лазерного сигнала. При увеличении дистанции вдвое мощность сигнала на фотоприемнике снижается в 4 раза. С другой стороны, уменьшение угловой расходимости может усилить влияние атмосферной турбулентности, что также приведет к дополнительным потерям.

2.3 Анализ методов стабилизации и сопровождения луча

При проектировании оптического канала связи на корабле ключевым фактором, влияющим на его работоспособность, является качка - колебания судна, вызванные волнением моря, ветром или маневрами судна. Эти движения приводят к угловым отклонениям передающей и приемной оптических систем, нарушая передачу сигнала узконаправленными лучами, что критично для стабильной передачи данных. Даже незначительные угловые смещения, связанные с креном или дифферентом, могут вызвать частичную или полную потерю сигнала. Для минимизации воздействия качки применяются

стабилизаторы корабельной платформы — активные или пассивные системы, снижающие амплитуду колебаний. Однако их эффективность ограничена, особенно в условиях сильного волнения, поэтому в системы АЛС интегрируют дополнительные подсистемы динамической стабилизации: гироскопические платформы, быстродействующие сервоприводы и алгоритмы адаптивной коррекции луча, компенсирующие остаточные движения в реальном времени. Совместная работа механических стабилизаторов судна и оптических систем автоматического слежения позволяет сохранять направленность канала даже при умеренной качке, обеспечивая непрерывность связи. Тем не менее, в экстремальных условиях сохраняется риск прерывания передачи.

Рассмотрим влияние качки на работу АЛС. Безусловно, стабилизаторы, гироскопы и системы наведения справляются при штатной ситуации. Что же будет происходить со связью во время шторма? К сожалению, в свободном доступе отсутствует данная информация. Смоделируем ее и проведем небольшой расчёт «на бумаге». При шторме в 6 баллов по шкале Бофорта высота волны будет изменяться от 2 до 3. Логично, что амплитуда вертикальной качки судна меньше чем высота волны. Если длина судна значительно больше длины волны, судно "пересекает" гребни, и амплитуда стремится к высоте волны. В открытом доступе отсутствуют стабилизаторы, которые могли бы эффективно справляться с такими значениями перепадов высот корабля, что говорит либо об их секретности, либо о невозможной или не оправданной реализации в мире.

Необходимо отметить, что данные погодные условия вполне являются тяжелыми для многих систем корабля. Рассмотрим умеренное волнения в 4 балла, тогда высота волны будет варьироваться от 0.75м до 1.25м. Компенсировать такие амплитуды для бюджетных или слабых стабилизаторов будет достаточно сложно. Дорогие высокотехнологичные устройства способны выдержать такие нагрузки и сохранить штатную работу оптического канала связи на корабле.

Стабилизаторы, применяемые для обеспечения работы оптического канала связи на корабле, делятся на два уровня: стабилизация корабельной платформы и стабилизация оптического оборудования. На уровне судна используются механические системы, такие как пассивные стабилизаторы (кили, скуловые выступы), снижающие амплитуду качки за счет гидродинамических сил, и активные системы — гироскопические стабилизаторы или управляемые рули, которые в реальном времени компенсируют колебания, используя данные датчиков угловой скорости и акселерометров. Однако даже эти системы не устраняют микродвижения, критичные для узконаправленных оптических лучей. Поэтому оптические терминалы оснащаются собственными стабилизирующими подсистемами: гиросtabilизированные платформы с электромеханическими приводами удерживают передатчик и приёмник в заданном положении, компенсируя угловые отклонения с точностью до долей градуса. Для коррекции высокочастотных вибраций применяются пьезоэлектрические или магнитные быстродействующие приводы, меняющие ориентацию зеркал или линз со скоростью до сотен герц. Алгоритмы на базе ПИД-регуляторов или машинного обучения прогнозируют траекторию движения корабля по данным инерциальных датчиков и заранее корректируют положение оптических элементов. В продвинутых системах используется адаптивная оптика - деформируемые зеркала, компенсирующие атмосферные искажения и микросдвиги луча. Современные разработки включают микроэлектромеханические системы стабилизации, сочетающие компактность и высокую скорость реакции. Интеграция корабельных и оптических стабилизаторов создаёт многоуровневую защиту, но их эффективность зависит от согласованности работы: задержки в передаче данных между гироскопами и приводами, инерционность механических компонентов или резонансные частоты могут привести к остаточным колебаниям.

2.4 Подведение итогов анализа оптического канала связи на корабле

Итак, связь по лазерному лучу через атмосферу в настоящее время стала реальной. Она обеспечивает передачу большого количества информации с высокой надежностью и скоростью на расстояниях до 10 км. Однако можно отметить, что присутствует ряд недостатков.

1. При незначительном ухудшении видимости ухудшается скорость передачи информации (система вынуждена переходить на более длинные волны ИК диапазона).
2. При значительном ухудшении связь может быть не доступна вовсе.
3. Присутствует вероятность потери пакетов передаваемой информации, что влечёт за собой получение поврежденных файлов.

Важно отметить, что на Российском рынке находятся актуальные системы, но, к сожалению, они уступают зарубежным аналогам по техническим характеристикам и отношению их к цене. В следующей главе будут выработаны рекомендации по улучшению данных систем и представлено решение по усовершенствованию оптического канала связи.

3 ГЛАВА РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА КОРАБЛЕ

На основе информации, рассмотренной во второй главе, можно сказать что, основной проблемой является некачественное (например, потери) соединение или его временное отсутствие. Что негативно сказывается на использовании оптическим каналом связи, и его популярности на флоте. Можно классифицировать конкретные проблемы по следующему принципу.

1. Засветка от источников света (например, солнце).
2. Нежелательные атмосферные условия (град, дождь, туман, атмосферная турбулентность).
3. Физическое воздействие на судно (в основном волновая качка)
4. Влияние качки.

В случае засветки фоточувствительного элемента приемника, на время ее воздействия связь будет утеряна. Например, судно 1 передает информацию судну 2, которое расположено географически восточнее, чем судно 1 во время заката. Солнце засвечивает фотодетектор получателя. Следовательно, связь через оптический канал связи практически не возможна. Такая проблема встречается достаточно редко и при исключительных обстоятельствах.

Нежелательные атмосферные условия являются наиболее частой и самой сокрушительной проблемой от потери скорости до полной утраты связи. Зачастую системы работают в ИК диапазоне, где длина волны светового сигнала варьируется от 850 нм до 1500 нм. Чем длиннее волна, тем меньше препятствий встречает на пути луч и соответственно меньше рассеивается.

На основе анализа данных проблем можно предложить комплексное решение, которое сможет минимизировать потерю скорости, и пакетов информации, передаваемых с одного судна на другое - дуплексная система FSO.

3.1 Дуплексная система FSO

Дуплексная система – рисунок 13, объединяющая технологии атмосферной лазерной связи (FSO) и радиосвязи, представляет собой гибридное решение, направленное на максимизацию надежности, скорости и адаптивности передачи данных в условиях переменных внешних факторов. Ее работа основана на одновременном использовании двух физически различных каналов — оптического и радиочастотного, — что позволяет исключать недостатки каждой из технологий в отдельности. Например, FSO, обеспечивающая высокую пропускную способность до сотен Гбит/с, уязвима к атмосферным помехам: туман, дождь или турбулентность могут полностью заблокировать оптический сигнал. Радиосвязь имеет меньшую пропускную способность, но ожидаемо демонстрирует устойчивость к погодным условиям. Сталкивается с ограничениями полосы пропускания и помехами в перегруженном частотном спектре.



Рисунок 13

Архитектура такой системы может быть реализована в двух основных вариантах. Первый предполагает разделение каналов по направлениям передачи данных: FSO используется для нисходящего потока. Например, передачи объемного контента вроде видео высокой четкости или облачных данных, а радиосвязь отвечает за восходящий канал, передающий управляющие сигналы, запросы пользователей или телеметрию. Второй подход подразумевает полноценный дуплекс, где оба канала задействованы для двусторонней передачи, а их пропускная способность объединяется с помощью технологий связывания каналов - Link Aggregation, таких как IEEE 802.3ad. Это требует сложной и точной

синхронизации, особенно при различии задержек: оптический сигнал в FSO распространяется с задержкой около 1 мс на километр, тогда как радиоволны в средах с многолучевым распространением могут добавлять до 10 мс/км. Для устранения этой проблемы применяются алгоритмы буферизации и протоколы синхронизации времени, например, IEEE 1588 Precision Time Protocol, которые выравнивают временные метки пакетов.

Ключевым техническим аспектом является управление интерференцией между каналами. Поскольку FSO работает в инфракрасном диапазоне, чаще всего длина волны в мощных лазерах достигает 1550 нм, а радиосвязь — в СВЧ-диапазоне, актуальные 30 ГГц для 5G, их частотные спектры не пересекаются, что минимизирует взаимные помехи. Однако мощные радиопередатчики могут создавать наводки в чувствительных оптических приемниках. Для решения этой проблемы используют пространственное разделение антенн и приемопередатчиков, а также фильтрацию частот на аппаратном уровне. Кроме того, применяются адаптивные методы модуляции и кодирования, которые динамически подстраивают параметры сигналов в зависимости от качества канала. Например, в ясную погоду FSO может использовать высокоэффективные схемы модуляции, а при ухудшении условий автоматически переключаться на более устойчивые, но менее скоростные методы, параллельно перенося часть трафика на радиоканал.

Реальным примером может служить развертывание городской сети «последней мили» в большом городе. Аппаратура, установленная на высотном здании, оснащается FSO-передатчиком с длиной волны 1550 нм и мощностью 200 мВт, обеспечивающим скорость 10 Гбит/с на расстояние до 2 км, а также 5G-радиоинтерфейсом с шириной полосы 400 МГц. Абонентские терминалы, размещенные на соседних зданиях, принимают данные через оптический канал, а обратную связь отправляют по радиоканалу. В случае внезапного тумана или сильного дождя,

которые ослабляют FSO-сигнал на 20-30 дБ, система автоматически перераспределяет трафик на радиочастотный канал, сохраняя минимальную скорость 2 Гбит/с. При восстановлении условий FSO возобновляет работу в полном объеме, а алгоритмы агрегации каналов суммируют пропускную способность, достигая 12 Гбит/с. Такая конфигурация особенно востребована в крупных городах, где требуется высокая скорость для систем видеонаблюдения и облачных сервисов.

Однако гибридные системы сталкиваются с рядом проблем. Разница в пропускной способности каналов создает асимметрию трафика: если FSO обеспечивает 100 Гбит/с, а радиосвязь — лишь 5 Гбит/с, это может привести к перегрузке радиоканала при резком ухудшении оптических условий. Для балансировки используются алгоритмы прогнозирования погоды на основе данных метеодатчиков и ИИ-моделей, которые заранее инициируют перераспределение трафика. Еще одной проблемой является энергопотребление: FSO-модули, особенно с адаптивной оптикой для компенсации турбулентности, требуют значительной мощности, что ограничивает их применение в мобильных устройствах. Решением становятся гибридные энергосистемы, сочетающие солнечные панели и аккумуляторы, а также оптимизация алгоритмов управления лучом для снижения энергозатрат.

Стоит отметить, что данные системы полностью нивелируют секретность передаваемых файлов, радиосвязь подвержена перехвату, а поскольку она полностью дублирует сигнал из оптического канала связи, вся передаваемая информация имеет риск попасть в руки недоброжелателя.

3.2 Разработка прототипа

Конечной целью данной дипломной работы является модернизация уже готовой системы, обеспечивающей оптический канал связи на

корабле, с учетом устранения или смягчения ряда проблем в его классической версии.

Для разработки прототипа будут использованы уже существующие устройства, которые можно будет заменить на их аналоги. Однако технические характеристики будут отличаться от расчётных. Поскольку в открытом доступе находится слишком маленькое количество информации о Российских системах оптического канала связи, выбор комплектующих пал на следующие модели:

1. Лазерный модем от AOptix – Intelligent Laser Link – рисунок 14 обеспечивает скорость до 10 Гбит/с, на расстоянии до 10 км, ИК диапазон 1550 нм, устойчивость к атмосферной турбулентности.
2. УКВ радиостанция Huawei RTN 380 – рисунок 15 работает на частоте 28-32 ГГц, поддерживает скорость до 2 Гбит/с на расстоянии до 8 Км, длина волны от 9 до 10 мм



Рисунок 14



Рисунок 15

Мы уже знаем, что оптический канал связи (FSO) часто используется в связке с отдельно вынесенным УКВ каналом (в паре). Однако их принцип работы оставляет за собой проблему секретности передаваемых данных. В данной дипломной работе мною будет предложен альтернативный вариант их совместной работы – по очереди. В зависимости от наличия помех, влекущих за собой потерю пакетов.

Мною предложен следующий принцип работы. Основной канал передачи информации является оптическим, при возникновении помех или потери соединения вовсе, включается резервный УКВ, радиоэлектронный канал, и данные передаются по нему. После устранения нештатной ситуации и готовности лазерных модемов к передаче данных УКВ канал отключается, трансляция пакетов информации начинает осуществляться по оптическому каналу. Принцип своеобразного переключателя каналов связи в зависимости от наличия помех.

Для успешной работы прототипа потребуется система обнаружения помех. В нее будут входить: термометр, гигрометр, барометр, анемометры, измеритель количества осадков, датчики грозовой активности. Система должна учитывать показания всех этих датчиков и обратный световой поток от FSO (лазерный луч, отвечающий за успешную передачу данных) для вынесения решения – переключать канал связи или нет.

Разберем его чуть подробнее на примере и составим модель устройства. Обозначим лазерные модемы Intelligent Laser Link, как FSO1 FSO2, а радиомодем RTN 380, как UKV. Смоделируем передачу данных, возникновение потери связи, ее восстановление.

1. FSO1 и FSO2 навелись друг на друга и от первого к второму происходит передача данных. FSO 2 в ответ на получение трафика отправляет сигнал в фотодетектор FSO1, обозначающий штатную работу системы и успешное получение пакетов информации, система обнаружения помех разрешает трансляцию через оптический канал связи.
2. Возникает внештатная ситуация на время t , подключение между оптическими модемами потеряно. Ни один из двух лазерных лучей не попадает на фоточувствительную часть ни одного модема, а система обнаружения помех фиксирует непригодные погодные условия для передачи информации.
3. Включается UKV связь, и начинает передавать трафик на время t (на время потери связи). Оптический канал отключен.
4. Внештатная ситуация устраняется, лазерные модемы навелись друг на друга, а управляющий сигнал из FSO2 сигнализирует FSO1 о готовности к трансляции, система обнаружения помех разрешает переключения канала обратно на оптический.
5. UKV связь отключается, передача данных начинает идти по оптическому каналу.

Для реализации данного переключающего механизма воспользуемся современными цифровыми технологиями. А именно языком программирования Python - один из самых популярных и востребованных языков программирования в мире. В силу своей простоты, универсальности и надежности. Важно уточнить, что структура кода достаточно простая и ее легко можно перенести на другие языки. Программированию будет подлежать небольшой микроконтроллерный модуль Raspberry Pi Pico (RP2040) – рисунок 16. Важно отметить что, на микроконтроллере установлена операционная система «MicroPython» для успешной работы на выбранном языке программирования. Моделирование реагирующей на помехи и переключающей каналы связи системы будет происходить в онлайн-симулятор электроники и программирования микроконтроллеров – Wokwi. это бесплатный веб-сервис для моделирования электронных схем и программирования микроконтроллеров прямо в браузере. Подходит для обучения, прототипирования и тестирования кода без реального железа.

Обоснованием выбора Raspberry Pi Pico (RP2040), как управляющего модуля системы могут служить следующие аргументы. Система обнаружения помех может быть реализована на одном микроконтроллере с системой переключения каналов связи. При установке операционной системы (например, Mbed OS), отпадает потребность в полноценном компьютере, информация может передаваться напрямую через Pi Pico с каких-либо устройств до получателя. Удаленный доступ с возможностью управления микроконтроллером и всем происходящим в нем процессах.

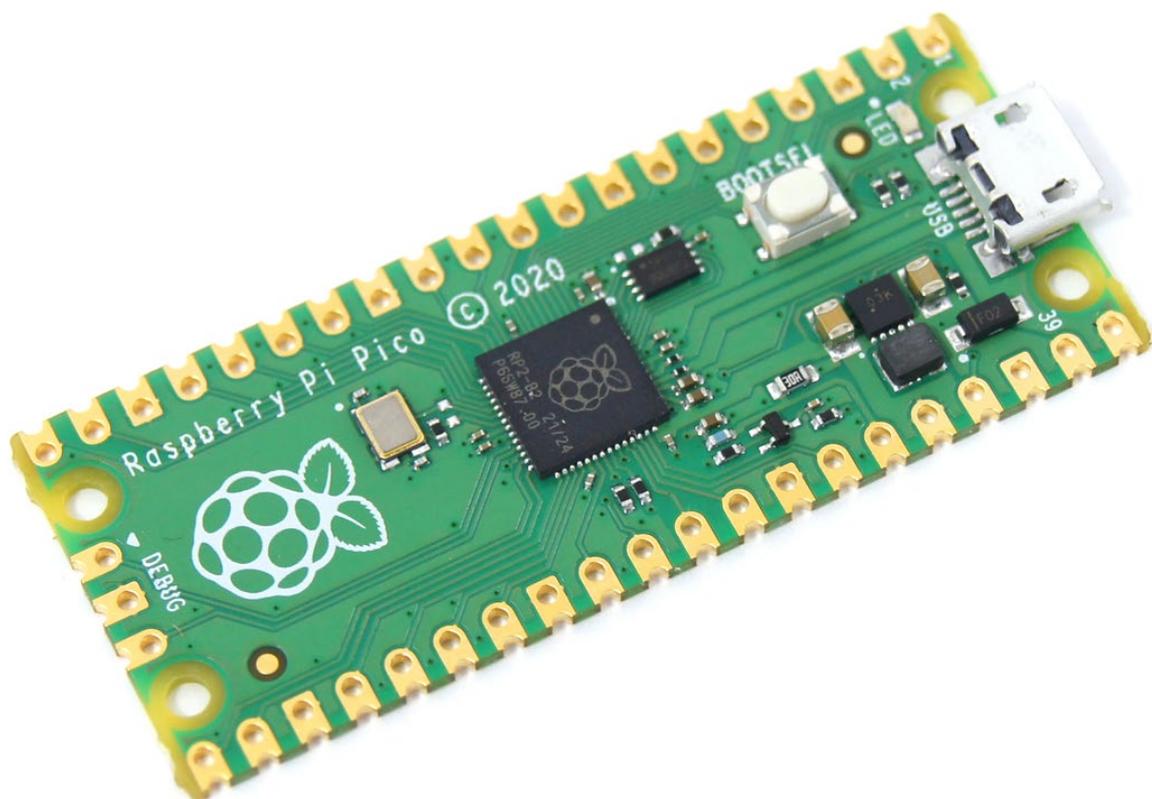


Рисунок 16

3.3 Создание модели системы в Wokwi

Начнем с создания виртуальной системы имитирующей реальные комплектующие. В которые входит микроконтроллер, два светодиода (красный и синий), кнопка, элемент распайки – рисунок 17.

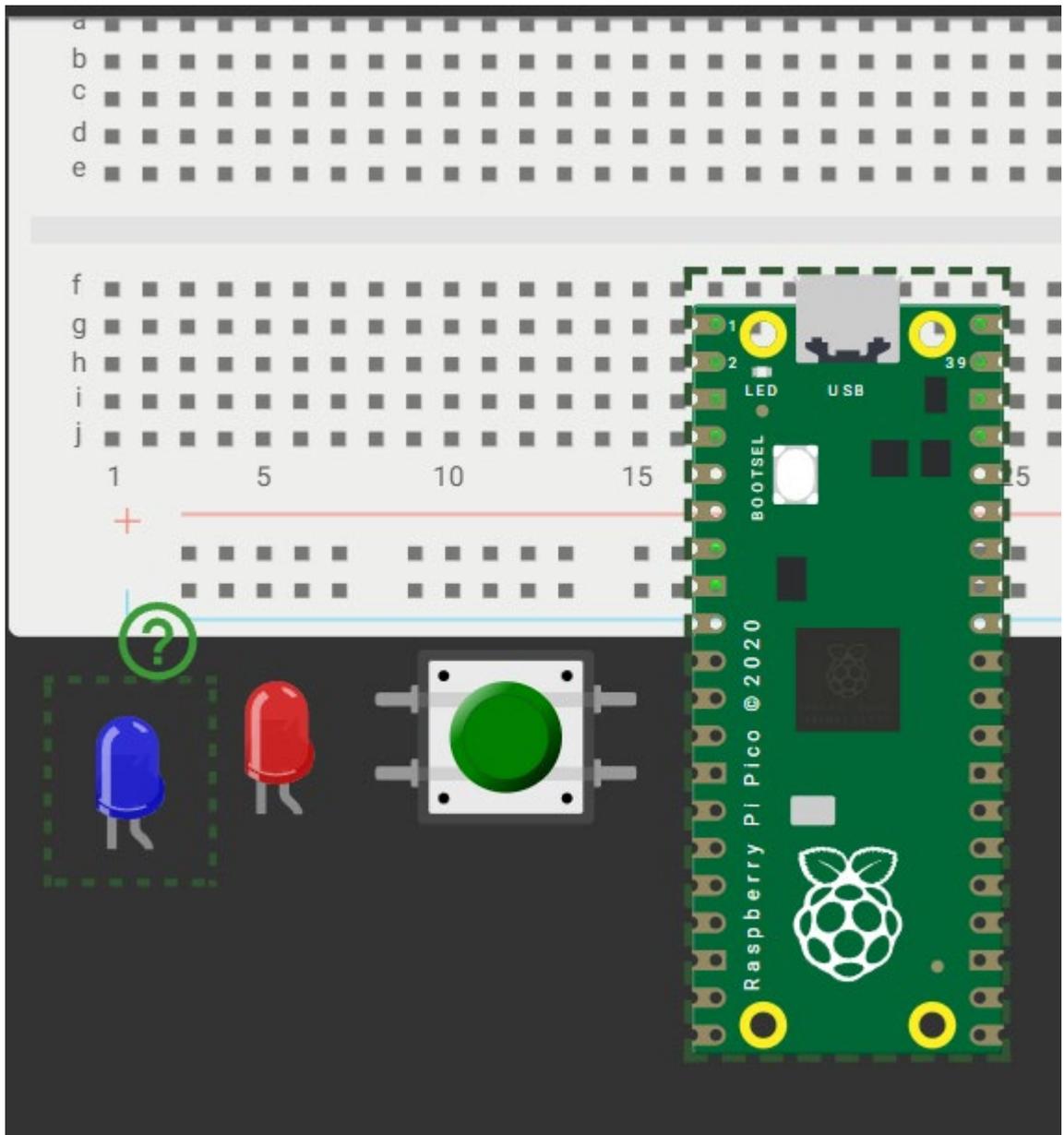


Рисунок 17

Инструментом «провод» виртуально спаиваем нашу схему – рисунок 18. Важно отметить, как должно работать это устройство. Микроконтроллер является программируемым переключателем. Он будет направлять поток информации в двоичной кодировке на пины (порты). Нумерация обозначается, как Pico GPn, где n это номер порта. Красный светодиод будет имитировать оптический канал связи (FSO), аналогично синий - УКВ радиосвязь. Зеленая кнопка будет симулировать наличие помех, по принципу кнопка включена – помехи (потеря связи), кнопка выключена – помех нет (штатный режим работы). Описание правильной распайки контактов в виртуальной среде

Wokwi находится по кнопке «?» - рисунок 17. Короткая ножка светодиода подключается к питанию, длинная к управляющему сигналом порту.

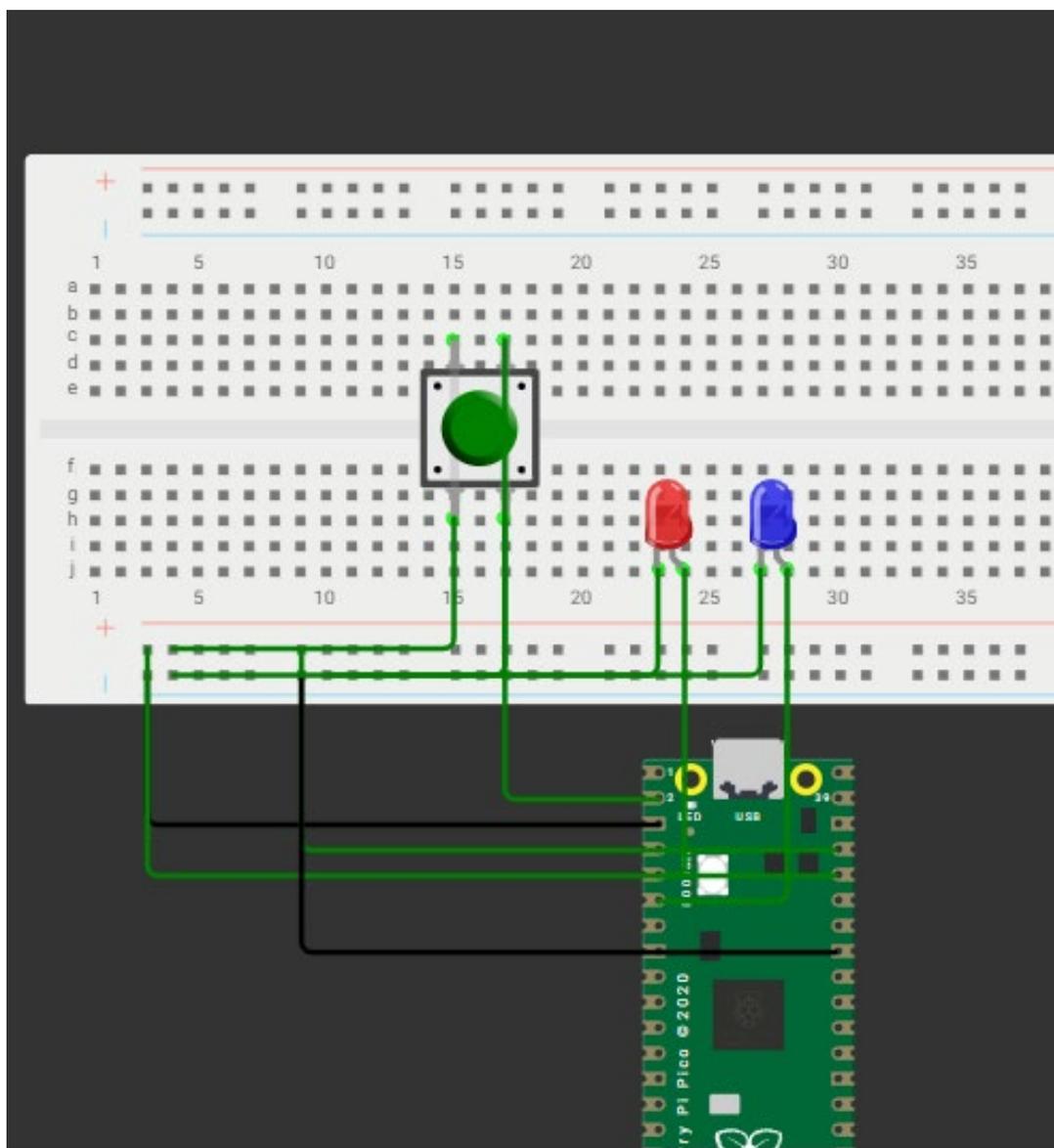


Рисунок 18

Переходим к написанию кода на Python – рисунок 19,20.

```

1 import time
2 from machine import Pin
3
4 class Channel:
5     """ Общий интерфейс для работы с каналами связи """
6     def __init__(self, tx):
7         """ Инициализация канала связи """
8         self.tx = tx
9
10    def set_value(self, value):
11        """ Установка значения передачи данных в канале """
12        self.tx.value(value)
13
14    class FSO(Channel):
15        """ Канал передачи FSO """
16        def __init__(self, tx: Pin):
17            super().__init__(tx)
18
19    class UKV(Channel):
20        """ Канал передачи UKV """
21        def __init__(self, tx: Pin):
22            super().__init__(tx)
23
24    class Mediator:
25        """ Посредник который управляет переключением между каналами связи """
26        def __init__(self, interaption_pin: Pin = Pin(1, Pin.IN, Pin.PULL_UP)):
27            self.interaption_pin = interaption_pin # Пин для эмуляции помех
28            self.ukv = UKV(Pin(4, Pin.OUT)) # Канал UKV
29            self.fso = FSO(Pin(3, Pin.OUT)) # Канал FSO
30            self.interference_flag = False # Флаг о наличии помех
31            self.last_button_state = self.interaption_pin.value() # Кеш для правильной обработки состояния помех
32

```

Рисунок 19

```

32
33     # Инициализация начального состояния
34     self.update_leds()
35
36     def update_leds(self):
37         if self.interference_flag:
38             # Включаем UKV (0 = включен для активного низкого уровня)
39             self.ukv.set_value(1)
40             self.fso.set_value(0)
41         else:
42             # Включаем FSO
43             self.fso.set_value(1)
44             self.ukv.set_value(0)
45
46     def handle_button(self):
47         current_state = self.interaption_pin.value()
48         # Обнаружение нажатия (переход с высокого на низкий уровень)
49         if current_state == 0 and self.last_button_state == 1:
50             self.interference_flag = not self.interference_flag
51             self.update_leds()
52             time.sleep_ms(100) # Задержка для антидребезга
53
54         self.last_button_state = current_state
55
56 # Создаем экземпляр и запускаем цикл
57 mediator = Mediator()
58
59 # Запускаем посредника
60 while True:
61     mediator.handle_button()
62     time.sleep_ms(10)

```

Рисунок 20

3.4 Проверка работоспособности системы

Проведем проверку работоспособности системы:

1. Система запустилась, не тормозит, ошибки отсутствуют. Горит красный светодиод – рисунок 21, сигнализирующий, что идет трансляция по оптическому каналу связи (передаются пакеты информации).
2. Искусственно вызываем помехи или полную потерю связи между лазерными модемами FSO. Загорелся синий светодиод – рисунок 22. Его работа означает, что УКВ связь успешно включена и уже передает информацию вместо оптической. Красный светодиод ожидаемо не горит – информация не передается по оптическому каналу.
3. Второе нажатие на кнопку выводит фактор помех и потери сигнала на оптическом канале связи. Красный светодиод снова загорается, синий гаснет. Возвращается штатная работа системы.

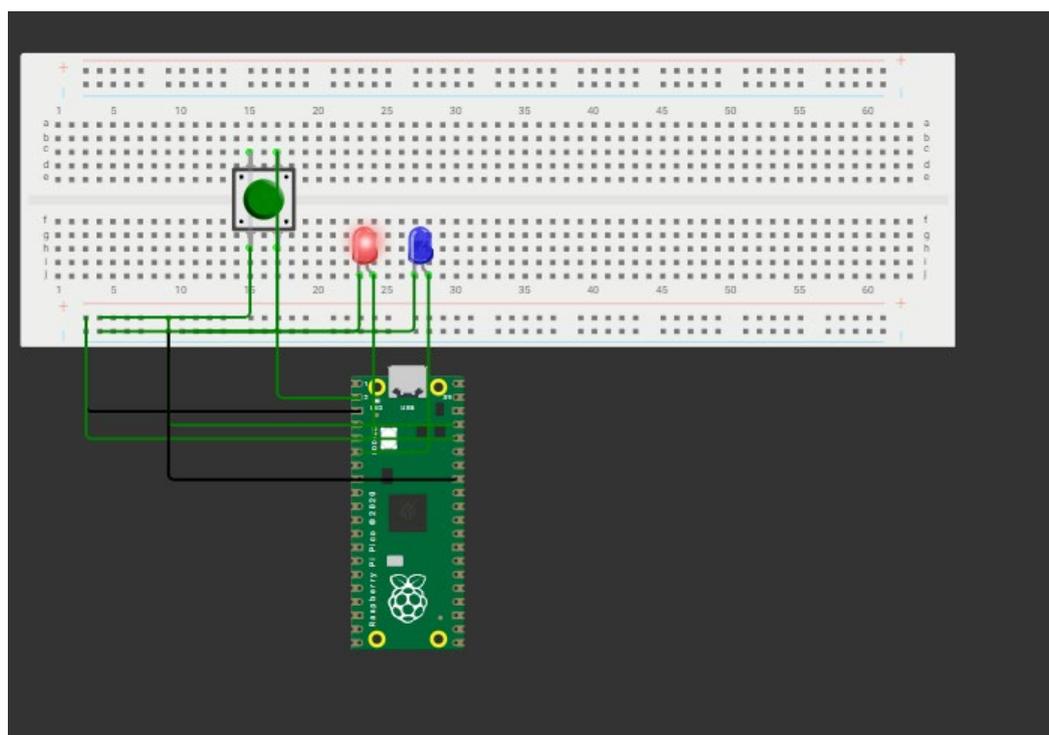


Рисунок 21

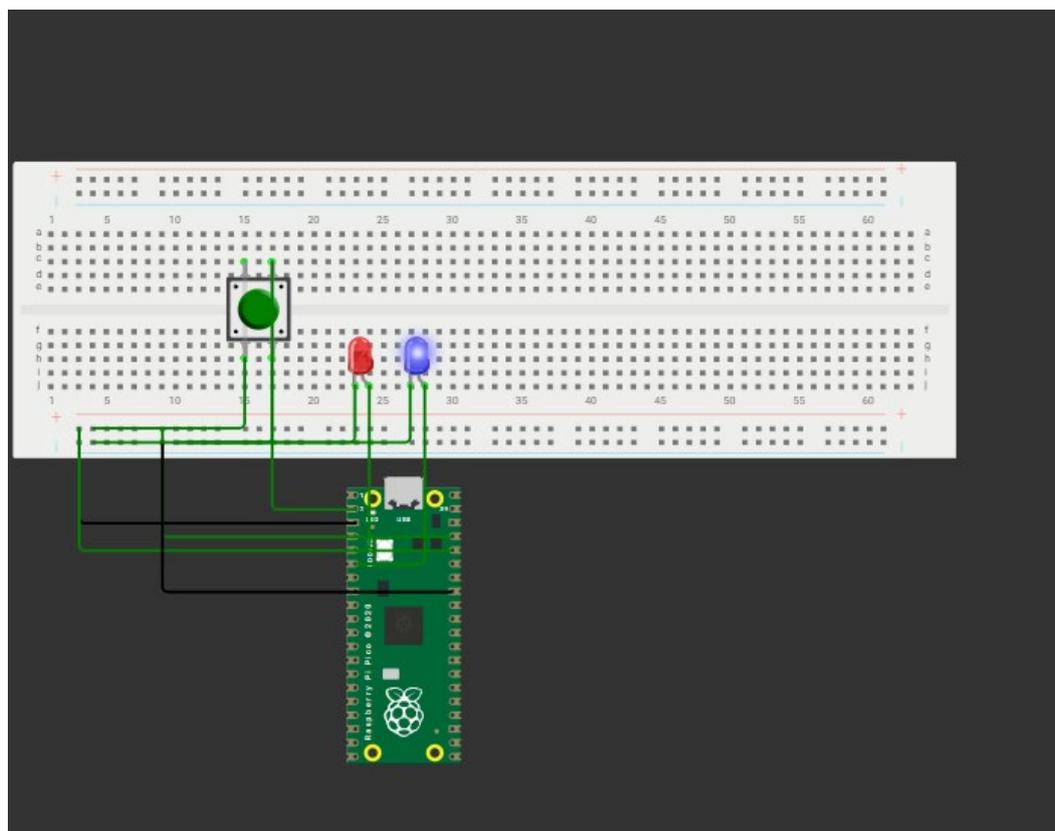


Рисунок 22

Подробнее разберем, как работает эта модель, и составим блок схему – рисунок 23 (логику) для кода на Python. Код создает по принципу наследования, два абстрактных канала связи FSO – оптический, UKV – радиосвязь. Программируется подпрограмма «посредник» - цифровой переключатель каналов, который ими управляет. Задается небольшой объём кэш памяти для фиксации наличия помех. Далее проходит инициализация начального состояния FSO включен, UKV выключен. Логическое выражение: есть помехи - переключение передачи данных на FSO, иначе - возврат в начальное состояние, управляет источником передачи информации (каналами связи). Создание в бесконечном цикле проверки на наличие помех с задержкой в 100 мс, для общей синхронизации процесса. Запуск алгоритма.

3.5 Блок схема для кода на Python



Рисунок 23

3.6 Перспективы улучшения прототипа

Несмотря на то что, прототип разрабатывался на базовых комплектующих, он может быть улучшен их заменой на более мощные варианты. Простейший микроконтроллер легко заменяется на более сложный и дорогой аналог. Абсолютно так же как и код может быть переписан на альтернативный язык. Разработка является отличной базовой структурой, наглядно показывающую работу всей системы, на основе которой можно создать многозональную установку, обеспечивающую невероятно защищенный канал связи. Приватность трафика достигается следующим путём. Поскольку оптический канал связи практически невозможно перехватить, недоброжелатель сможет это сделать используя УКВ связь в момент потери соединения лазерных модемов. Однако, после восстановления соединения риск перехвата сходит на нет. Злоумышленник сможет получить лишь часть пакетов информации. Вероятнее всего несущую минимальную смысловую нагрузку. Риск распознавания части перехваченной информации значительно уменьшится, если УКВ канал будет шифровать трафик на аппаратном уровне. Например, Gemalto (Thales) SafeNet Hardware Security Module (HSM) – рисунок 24



Рисунок 24

Аппаратные шифраторы представляют собой специализированные устройства, предназначенные для шифрования данных на физическом уровне с

высокой скоростью и безопасностью. Они используются в военной связи, банковских системах, надежно защищая информацию пользователя.

Необходимо отметить, какие улучшения могут быть актуальны для прототипа, переключающего каналы. Микроконтроллер Raspberry Pi Pico можно заменить на более производительный аналог STM32H7 – рисунок 25.

STM32H7 — это высокопроизводительный микроконтроллер семейства STM32 от компании STMicroelectronics, основанный на ядре ARM Cortex-M7. Он предназначен для задач, требующих высокой вычислительной мощности, энергоэффективности и работы с большими объёмами данных. Этот микроконтроллер широко используется в промышленной автоматизации, медицинском оборудовании, мультимедийных системах, робототехнике и других областях, где важна скорость обработки информации и надёжность. Основные характеристики STM32H7 включают тактовую частоту до 480 МГц (для ядра Cortex-M7) и до 240 МГц (для Cortex-M4 в двухъядерных версиях), что обеспечивает исключительную производительность для 32-битных микроконтроллеров. Объём встроенной памяти варьируется в зависимости от модели, зачастую до 2 МБ Flash. Для разработчиков STM32H7 предлагает широкие возможности благодаря поддержке популярных инструментов: среды STM32CubeIDE, библиотек HAL и LL, а также совместимости с операционными системами реального времени (FreeRTOS, ThreadX). Благодаря низкому энергопотреблению в режимах ожидания и активным режимам с динамическим управлением напряжением, этот микроконтроллер подходит для батарейных и передающих интернет трафик устройств. Его безопасность обеспечивается аппаратными криптографическими модулями (AES, SHA, RNG), защитой памяти и поддержкой безопасной загрузки.

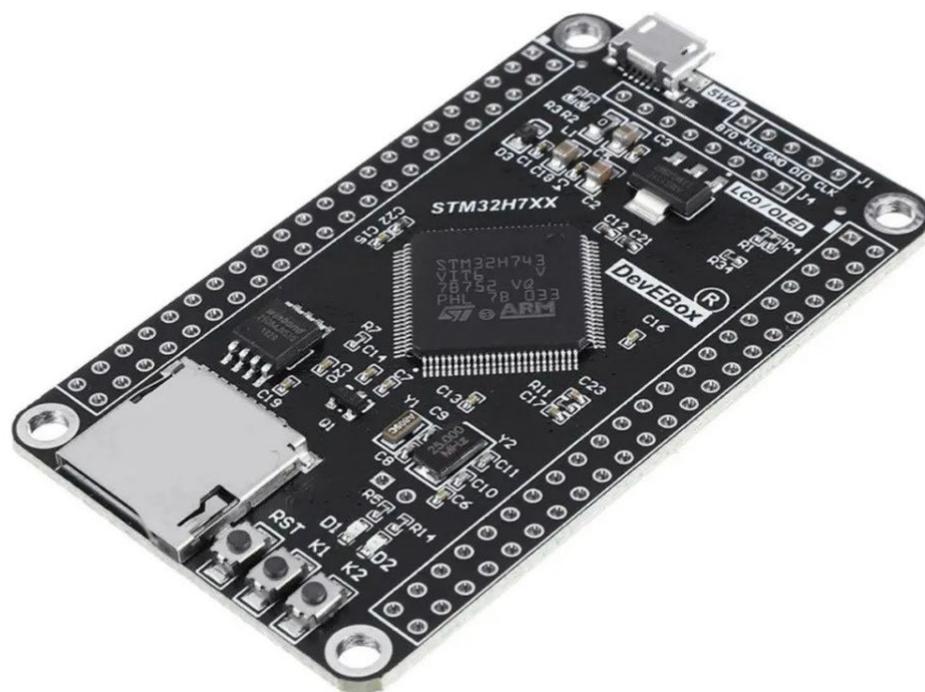


Рисунок 25

Самым актуальным языком программирования для STM32H7 является C++. Это мощный универсальный язык программирования, который сочетает в себе возможности низкоуровневого управления ресурсами и высокоуровневые абстракции, что делает его идеальным выбором для разработки сложных и высокопроизводительных систем, включая встраиваемые устройства. Будучи расширением языка C, C++ сохраняет все его преимущества, включая прямой доступ к памяти и аппаратному обеспечению, но при этом добавляет поддержку объектно-ориентированного программирования.

К сожалению, из-за отсутствия достаточного количества ресурсов в данной выпускной квалификационной работе отсутствуют прототип исполненный в жизни, более мощные комплектующие, а так же система обнаружения помех. Однако при достаточном финансировании все предложенные решения проблем оптической связи могут быть реализованными, что в свою очередь внесет свой вклад в развитие и популярность FSO на кораблях в России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном мире стремительный рост объемов передаваемой информации становится ключевым трендом, что неизбежно требует развития и модернизации систем передачи данных. Повышение пропускной способности существующих сетей превращается в необходимость для эффективной обработки крупных массивов данных. Внедрение инновационных технологий и методов передачи способствует увеличению производительности и надежности коммуникационных систем, что критически важно для поддержания оперативности и конкурентоспособности в условиях цифрового мира.

Особую актуальность приобретает задача обеспечения максимальной сохранности данных при их передаче на большие расстояния. Одним из перспективных решений этой проблемы выступает использование беспроводной оптической связи, которая открывает новые возможности для безопасной и стабильной коммуникации. Эта технология отличается такими преимуществами, как высокая пропускная способность, минимальные задержки передачи и устойчивость к электромагнитным помехам, что делает ее важным направлением для дальнейших исследований и разработок.

Развитие методов обработки информационных потоков играет значимую роль в организации эффективного взаимодействия между разнородными объектами. Например, внедрение беспроводной оптической связи может стать прорывом в создании надежных каналов коммуникации для подвижных объектов на воде - кораблях. Реализация представленного в данной выпускной квалификационной работе прототипа и комплексный подход к выбору его комплектующих смогут повысить популярность и надежность систем оптической связи на корабле. Подобные системы найдут применение в морских исследованиях, морской навигации, военных операциях и других сферах, где требуется передача данных в условиях нестабильной среды.

В результате выполненных работ цель выпускной квалификационной работы, заключающаяся в исследовании принципов построения оптических каналов связи на кораблях и разработка рекомендаций по их совершенствованию, была успешно достигнута. Решение всех поставленных задач, включая исследование физических основ оптической связи в морских условиях, ее сравнительный анализ с традиционными радиосистемами и разработка рекомендаций по совершенствованию систем оптического канала связи на судах, позволило систематизировать полученные данные и сформулировать обоснованные выводы. На основе которых мною было разработано устройство, которое успешно справляется со своими функциями. У комплектующих есть ряд достоинств: их доступность, простота использования и возможность масштабирования. Разработка является отличной базовой структурой, наглядно показывающую работу всей системы, на основе которой можно создать многозональную установку, обеспечивающую невероятно защищенный канал связи. Стоит отметить, что в представленном виде прототип отлично подходит для небольших гражданских и исследовательских судов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кобзев В. В., Милинкис Б.М., Емельянов Р. Г. Применение оптических квантовых генераторов для целей связи. М., Связь, 1965, 120 с.
2. Серопегин В.И. Беспроводные системы передачи данных локального, городского и регионального масштабов. Технология и средства связи, 1999, № 4, с. 72-77.
3. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю. С., Любовцева Ю.С. Физика атмосферы и проблемы климата. М., Наука, 1980, 320 с.
4. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М., Радио и связь, 1981, 288 с.
5. Гиносян Ю.А. Новые технологии беспроводного доступа. Технология и средства связи, 1999, № 4, с. 38- 39.
6. Лазарев А.С., Ткаченко В.Г. Морская радиосвязь и альтернативные технологии. — Севастополь: Мортехиздат, 2019. — 210 с.
7. Иванов Г.Г., Петров А.А. Лазерные системы связи в морских условиях. — Москва: Издательство «Морская техника», 2018. — 280 с.
8. Белов В.П., Соколов Д.И. Оптические технологии в телекоммуникациях. — СПб.: Наука, 2020. — 340 с
9. Кузнецов Н.Н., Михайлов А.Ю. Современные системы связи на морском транспорте. — Владивосток: Дальнаука, 2019. — 190 с.
10. Сидоров А.В., Громов К.Д. Атмосферная оптика и лазерная связь. — Москва: Физматлит, 2017. — 410 с.
11. Рыбаков С.И. Инновационные технологии в судовой связи. — Калининград: Балтийский научный центр, 2021. — 175 с.
12. AOptix Technologies. Intelligent Laser Communication Systems. White Paper, 2018. – 30 с.