

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Кушалиева Динара Айдаркызы

Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием  
технологий VLC и Li-Fi

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

6B06201 Телекоммуникация

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизирующей и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Проектирование высокоскоростного канала связи с  
использованием технологий VLC и Li-Fi»

6B06201 Телекоммуникация

Выполнил

Кушалиева Д.А.

Рецензент

Научный руководитель  
к.ф-м.н., ассоц. профессор  
кафедры ЭТиКТ

кандидат технических наук, доцент  
АУЭС им.Г.Даукеева

Ермекбаев М.М.

Жунусов К.Х.

« 7 » 2024 г.

« 7 » 2024 г.

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

6B06201 Телекоммуникация



### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Кушалиевой Динаре Айдаркызы

Тема: Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi

Утверждена приказом ректора университета № 408-П/Ө от «23» 11 2022 г.

Срок сдачи законченной работы «10» октября 2024г.

Исходные данные к дипломной работе: Использование видимого света в качестве несущей сигнала. Проектирование сети VLC в отделении банка с  $D \times Ш = 18 \times 12$  (м).

Использование волоконно-оптического кабеля марки ОКБ-М8П-10-0,22-8 для проектирования ВОЛС.

Зависимость пропускной способности сети Li-Fi от расстояния при различных показателях силы света.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Анализ и структура сети технологии Visible Light Communication
- б) Принцип работы технологии VLC
- в) Архитектура VLC
- г) 1.3 Методы модуляции VLC

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1 Анализ оборудования на основе VLC

2 Расчет пропускной способности сетей Li-Fi

3 Расчет волоконно-оптической линии связи

Рекомендуемая основная литература:

- 1 Неволин, Д. Г. Помехоустойчивость беспроводных оптических локальных сетей передачи данных на базе светодиодов видимого излучения: монография / Д. Г. Неволин, И. П. Петрусь. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017.
- 2 Архипов А. Проектирование и разработка энергосберегающих светодиодных систем освещения / А. Архипов // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – № 2. – С. 42–45.
- 3 Гальчина Н. А. Мощные белые светодиоды и модули на их основе для целей освещения / Н. А. Гальчина [и др.] // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 26–28.

### ГРАФИК

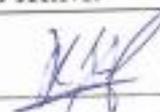
подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ и структура сети технологии Visible Light Communication	1.02.2024 г. - 30.02.2024 г.	Выполнено
Анализ оборудования на основе VLC	1.03.2024 г. - 25.04.2024 г.	Выполнено
Расчет пропускной способности сетей Li-Fi	25.04.2024 г. - 1.09.2024 г.	Выполнено

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Ассоциированный профессор кафедры ЭТиКТ к.ф-м.н. Жунусов К.Х.	30.10.2024 г.	
Нормоконтролер	Старший преподаватель кафедры ЭТиКТ, PhD, Досбаев Ж.М.	01.11.2024 г.	

Научный руководитель  Жунусов К.Х.

Задание принял к исполнению студент  Кушалиева Д.А.

Дата

« 1 » 02 2024

## **АНДАТПА**

Бұл тезисте біз банкті филиалдау үшін жарық байланысының көрінетін технологиясын қолдана отырып, жоғары жылдамдықтағы қауіпсіз желіні жобалап жатырмыз. Нұр-Сұлтан - Алматы қалалары арасында ТОВЖ құру үшін техникалық талдау жасалды. Деректерді беру желісінің техникалық есептері жасалды. Осы мақсаттар мен міндеттер үшін жоғары технологиялық жабдық таңдалды.

## **АННОТАЦИЯ**

В данной дипломной работе осуществляется проектирование высокоскоростной защищенной сети используя технологию Visible light communication для отделения банка. Разработан технический анализ для установления ВОЛС между городами Нур-Султан – Алматы. Произведены технические расчеты сети передачи данных. Подобрано высокотехнологичное оборудование для реализации проекта.

## **ANNOTATION**

In this diploma project, we are designing a high-speed secure network using visible light communication technology to branch a bank. A technical analysis has been developed to establish FOCL between the cities of Nur-Sultan - Almaty. The technical calculations of the data transmission network are made. High-tech equipment was selected for these goals and objectives.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Анализ и структура сети технологии Visible Light Communication	9
1.1 Принцип работы технологии VLC	9
1.2 Применение VLC	10
1.3 Архитектура VLC	13
1.4 VLC стандартизация	17
1.5 Методы модуляции VLC	19
1.6 Открытые проблемы исследования VLC	24
2 Анализ оборудования на основе VLC	26
2.1 Выбор оборудования на основе VLC	26
2.2 Передающий модуль LiFi-X Access Point	29
2.3 Приемный модуль Li-fi XC	31
2.4 Программирование	34
2.5 Усиление Интернета вещей с использованием световой связи и распределенных крайних вычислений	35
3 Расчет пропускной способности сетей Li-Fi	52
4 Расчет волоконно-оптической линии связи	61
4.1 Расчет параметров оптического кабеля	64
4.2 Расчет длины участка регенерации ВОЛС	67
4.3 Расчет помехозащищенности в когерентных ВОЛС	68
Заключение	69
Список используемой литературы	70
Приложение А	71

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных способов скоростной передачи информации является беспроводная связь. На сегодняшний день по всему миру установлено более 1.5 миллиона радиомачт, а в 2017 году количество мобильных устройств превысило численность населения Земли и с каждым днем их становится все больше. Увеличение количества устройств, обращающихся к мобильным сетям, является основной причиной резкого увеличения трафика мобильных данных. Согласно данным «Cisco Visual Networking Index», спрос на мобильную связь увеличивается более чем на 50% в год. Ожидается что к 2022 году более половины из подключенных устройств будут мобильными, 70% IP-трафика будет приходиться на мобильные устройства, 80% интернет-трафика будет приходиться на видео, требующее высокоскоростной беспроводной связи со средней скоростью до 200 Мбит/с. А уже сейчас передается более 1000 терабайт цифровой информации каждый месяц. Наданный момент массовой технологией доступа к Интернет-ресурсам и беспроводного соединения является «Wi-fi» (аббревиатура от «WirelessFidelity» — беспроводная высокая точность) в основе принципа работы которой используются радиоволны. Так в различных сетевых стандартах «Wi-fi» применяются волны частотой от 2,4 до 5 ГГц. Новейшим и самым быстрым является стандарт 802.11n который обеспечивает скорость передачи данных до 140 Мбит/сек.

Но спектр доступных радиочастот ограничен и с увеличением количества потребителей появились такие проблемы как:

- эффективность. В условиях плотной городской застройки и использованием одних и тех же радиочастот возникают помехи и шумы из-за их интерферирования, связанная с малой полосой пропускания. КПД же радиомодемов не превышает 5% так как почти вся их энергия уходит в тепло;
- экономичность. Базовые Станции невероятно дороги в установке и обслуживании, а также потребляют огромное количество энергии, при этом большая ее часть уходит на их охлаждение, а не на передачу данных;
- безопасность. Главным видом обеспечения беспроводной связи в офисах, предприятиях, да и просто в жилых домах являются беспроводные точки доступа «Wi-fi». Внутри помещений дальность связи современных «Wi-fi» адаптеров составляет от 40 до 70 метров, а в свободном пространстве до 400 метров. Отсюда следует что злоумышленники могут взломать и выкрасть важные конфиденциальные данные удаленно.

Поэтому стал важным вопрос нахождения более современной технологии, которая сможет решить данные проблемы. К ней можно отнести VLC (visible light communication). VLC является предпочтительным методом связи из-за его высокой пропускной способности и невосприимчивости к помехам от электромагнитных источников.

«Li-fi» это двунаправленная, беспроводная коммуникационная оптическая технология, которая обещает стать более дешевым и эффективным

методом беспроводной передачи больших объемов данных, сохраняя при этом высокую скорость, помехоустойчивость, экономичность, а самое главное безопасность, как экологическую, так и конфиденциальную. В качестве передатчика используются самые обычные LED-лампы, а в качестве носителя информации используется электромагнитные волны диапазона видимого света. Его спектр в 10000 раз больше, чем спектр радиоволн, который используется в повседневной жизни. «Li-fi» предоставляет скорость передачи до 1 Гб/сек, что более чем в 100 раз превышает возможности современных сетей Wi-fi, а теоретически, возможна скорость до 232 Гб/сек.

Целью данной работы является проектирование сети беспроводного доступа в отделении банка, с целью повышения уровня информатизации, безопасности и предоставления современных услуг связи: высокоскоростной доступ в Интернет на базе технологии Li-Fi.

# 1 Анализ и структура сети технологии visible light communication

## 1.1 Принцип работы технологии VLC

Системы связи в видимом свете (VLC) используют видимый свет для связи, который занимает спектр от 380 нм до 750 нм, соответствующий частотному спектру от 430 ТГц до 790 ТГц, как показано на рисунке 1.1. Проблема низкой полосы пропускания в радиосвязи решается в VLC ее тысячекратным увеличением. Приемник VLC принимает сигналы только в том случае, если он находится в пределах прямой видимости с передатчиком, поэтому приемники за пределами комнаты источника VLC не смогут принимать сигналы и, таким образом, у него есть невосприимчивость к проблемам безопасности, возникающим в РЧ системах связи. Поскольку источник видимого света может использоваться как для освещения, так и для связи, следовательно, он экономит дополнительную мощность, которая требуется для радиочастотной связи. Принимая во внимание вышеупомянутые преимущества, VLC является одним из многообещающих кандидатов из-за его особенностей нелицензионных каналов, высокой пропускной способности и низкого энергопотребления.

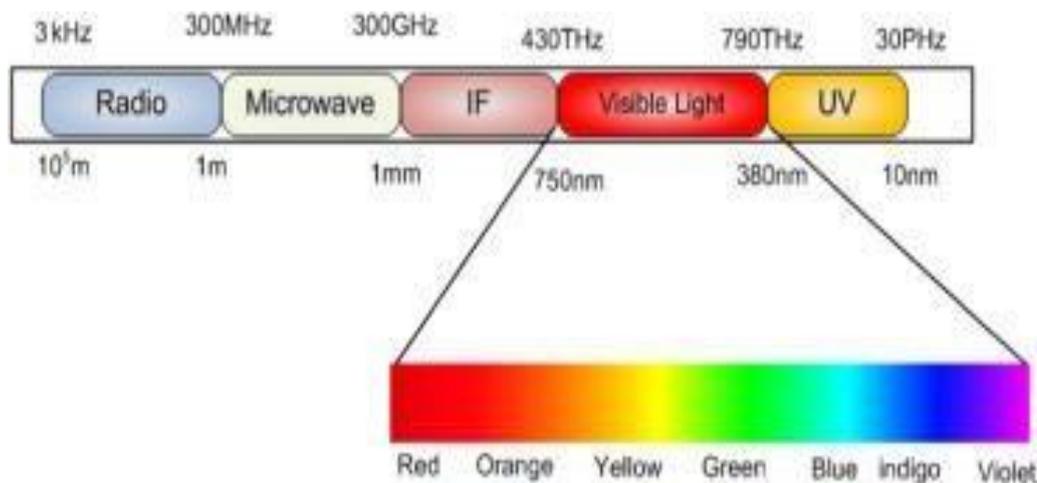


Рисунок 1.1 - Спектр частот VLC

VLC может использоваться в автомобильной связи для предупреждения о смене полосы движения, предварительного обнаружения столкновений и предупреждения о нарушении дорожного движения, чтобы избежать несчастных случаев. Эти приложения требуют связи с малой задержкой, которая обеспечивается VLC из-за его высокой пропускной способности. VLC также применяется в областях, чувствительных к электромагнитным волнам, таких как самолеты и больницы, где радиосигналы влияют на волны других приборов. Видимый свет используется как для освещения, так и для передачи информации с использованием методов VLC.

Проблемы, которые существуют при реализации VLC, включают [2]:

а) апомехи в источниках окружающего света;

- б) помехи между устройствами VLC;
- в) интеграцию VLC с существующими технологиями, такими как «Wi-Fi»

Чтобы справиться с вышеуказанными проблемами, необходима стандартизация VLC. Разработаны четыре стандарта, которые включают Японскую ассоциацию индустрии электроники и информационных технологий (JEITA) CP-1221, JEITA Cp-1222, JEITA Cp-1223 и IEEE 802.15.7. В 802.15.7 только MAC и PHY уровень определены для связи на коротком расстоянии с использованием видимого света. На стороне передатчика белый свет генерируется на основе преобразователей длины волны и светодиодов. Белый свет на основе светодиодов генерируется в дихроматическом, трихроматическом и тетрахроматическом режимах. Данные на стороне передатчика модулируются путем модуляции света; тем не менее, модуляция должна быть выполнена таким образом, чтобы избежать мерцания. Кроме того, уровень диммирования, выбранный для модуляции, должен быть таким, чтобы его поддерживали используемые светодиоды. Типичный приемник VLC состоит из схемы усиления, оптического фильтра и оптического концентратора.

## 1.2 Применение VLC

Врожденные особенности VLC включают высокую пропускную способность, отсутствие опасности для здоровья, низкое энергопотребление и нелицензионные каналы, которые сделали его привлекательным для практического использования. VLC можно найти множество применений, например как:

Li-Fi. В 2011 году Харальд Хаас первым назвал термин «Light fidelity» (Li-Fi). Li-Fi является высокоскоростной двунаправленной системой беспроводной связи в видимом свете и является аналогом Wi-Fi, который использует радиочастоту для связи. Сигналы Wi-Fi имеют проблему помех с другими радиочастотными сигналами, такими как помехи сигналов навигационного оборудования в самолете. Поэтому в областях, чувствительных к электромагнитному излучению, Li-Fi может быть лучшим решением;

-дорожная безопасность. VLC может использоваться для автомобильной связи с помощью наличия осветительных огней транспортного средства и существующей инфраструктуры дорожного регулирования и освещения. Высокоприоритетные приложения включают в себя: совместное предупреждение о возможном столкновении транспортных средств, предварительное обнаружение столкновений, предупреждение о смене полосы движения, предупреждение о нарушении правил дорожного движения и предупреждение о превышении скорости ближайших участников движения. Все высокоприоритетные приложения требуют надежность с чрезвычайно низкой задержкой. Из-за крайне низкой допустимой задержки в системе безопасности транспортного средства может использоваться высокоскоростная

система оптической связи, такая как Li-Fi, как показано на рисунке 1.2. В 2015 году была предложена наружная система VLC с использованием локальной сети контроллеров (CAN), а в предложенной системе для связи использовались дорожные фонари и фары;

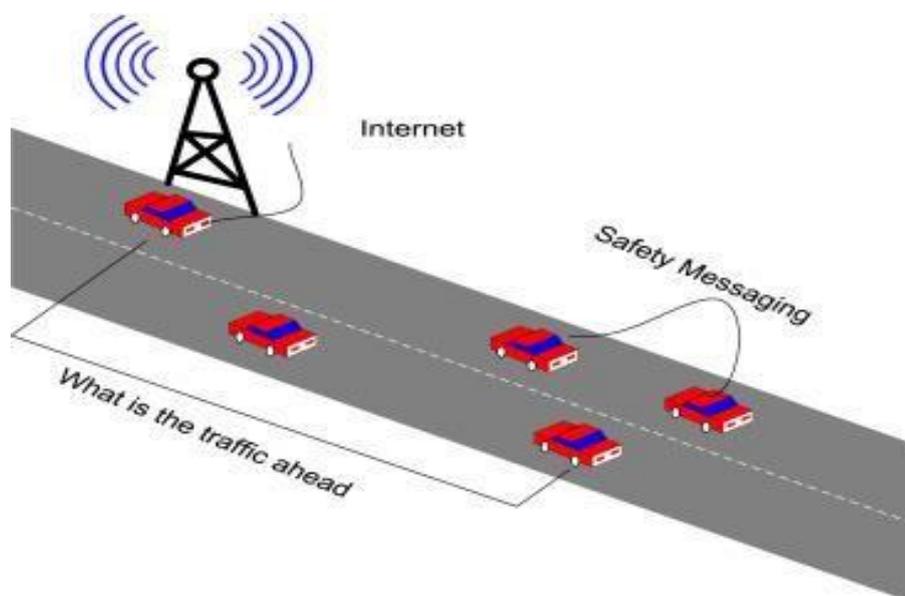


Рисунок 1.2 - VLC для автомобильных сетей

- подводная связь. РЧ-волны плохо распространяются в морской воде. Основная проблема состоит в том, что электромагнитные волны с частотами, используемыми в традиционной радиосвязи, сильно ослабляются при прохождении через толстый слой проводящего материала, которым является солёная морская вода. Так связь VLC может использоваться в подводных сетях связи «подводный аппарат с дистанционным управлением» (UTROV) является еще одним применением VLC в подводной связи. Различные работы, которые могут быть выполнены с использованием UTROV, включают в себя: Инспекция подводных сооружений и подводные работы; осмотр погружных конструкций, гидравлических дамб и других подводных сооружений; исследование морей и океанов с возможностью развертывания с кораблей;

- больницы. В больницах области, чувствительные к электромагнитным волнам (такие как сканеры МРТ), вероятно, переключатся на VLC, потому что это не будет мешать радиоволнам других устройств. В 2016 году был предложен робот под названием HOSPI, который использовался для транспортировки лекарств и медицинского оборудования в больницах. Усовершенствования системы управления в HOSPI были сделаны с использованием VLC, установленного в здании, и навигационных датчиков робота;

- вывески для отображения информации (Billboard). Вывески часто изготавливаются из множества светодиодов, которые, в свою очередь,

модулируются для передачи информации в аэропортах, на автобусных остановках и в других местах, где необходима передача данных. была описана вывеска, используемая для передачи данных. Этот тип вывески может использоваться для указаний в различных местах, таких как аэропорты, музеи и больницы;

- беспроводные локальные сети (WLAN). Связь с использованием множества светодиодов может использоваться при настройке локальных сетей. В схемах с использованием visible light communication предлагается сверхскоростное дуплексное LAN соединение, основанное на архитектуре звездной топологии с использованием связи в видимом свете со светодиодом, которая обеспечивает скорость более 10 Гбит/с и протестирована для массовых пользователей. Схема высокоскоростной локальной сети приведена на рисунке 1.3. Причиной проектирования сети с использованием топологии «звезда» является поддержка массовых пользователей. Протокол гибридного доступа используется в предлагаемой LAN, такой как мультиплексирование с временным разделением (TDM) для двунаправленной передачи VLC и мультиплексирования с частотным разделением (FDM) для передачи по восходящей и нисходящей оптоволоконной линии. Результаты предлагаемой локальной сети показали ее потенциальную мощь, предлагая высокоскоростной доступ для массовых пользователей. Система освещения используется для передающей линии связи, а инфракрасный свет используется для восходящей линии связи. Беспроводная локальная сеть VLC потенциально может использоваться в офисных зданиях и больницах, которые требуют высокого уровня безопасности.

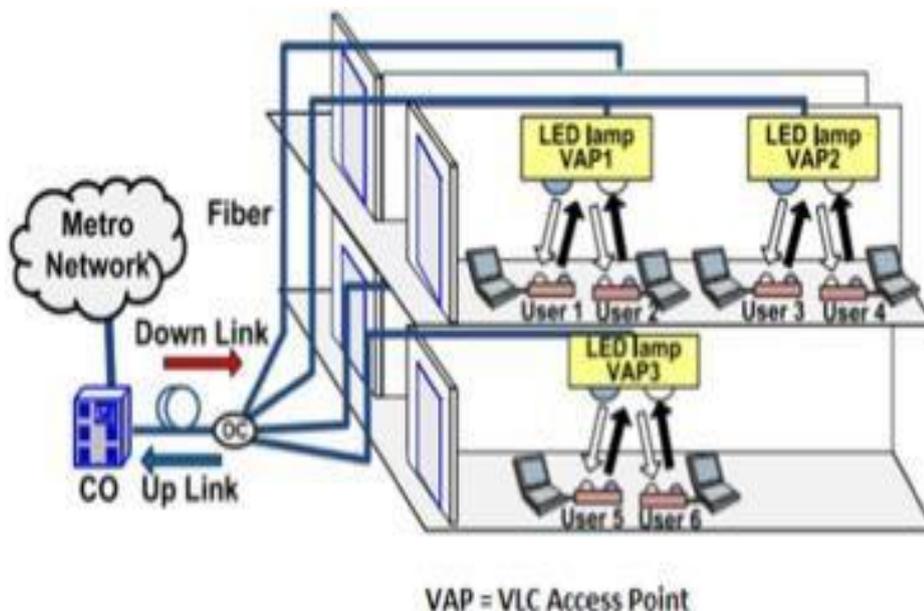


Рисунок 1.3 - Схема сети VLC

### 1.3 Архитектура VLC

Две неотъемлемые части системы VLC: передатчик и приемник обычно состоят из трех общих уровней показанных на рисунке 1.4. Это физический уровень, уровень MAC и прикладной уровень.

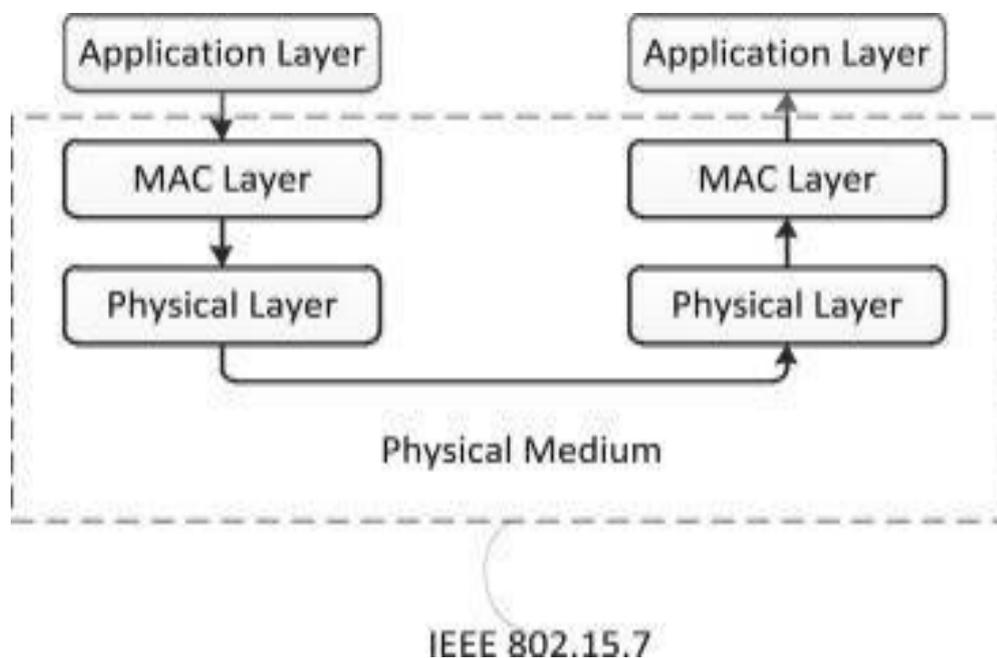


Рисунок 1.4 - Многоуровневая архитектура VLC

1.3.1 Уровень MAC. Задачи, выполняемые уровнем управления доступом к среде (MAC), включают в себя:

- а) поддержка мобильности;
- б) поддержка затемнения; в) поддержка видимости;
- г) поддержка безопасности;
- д) схемы сглаживания мерцания;
- е) поддержка цветовой функции;
- и) генерация сетевых маяков, если устройство является координатором;
- к) разъединение и поддержка vran;
- л) обеспечение надежной связи между равноправными объектами MAC.

Топологии, поддерживаемые уровнем MAC, являются одноранговыми, ширококестельными и звездообразными, как показано на рисунке 1.5. Связь в топологии «звезда» осуществляется с помощью одного централизованного контроллера. Все узлы связываются друг с другом через централизованный контроллер. Роль координатора в одноранговой топологии выполняет один из двух узлов, участвующих во взаимодействии друг с другом.

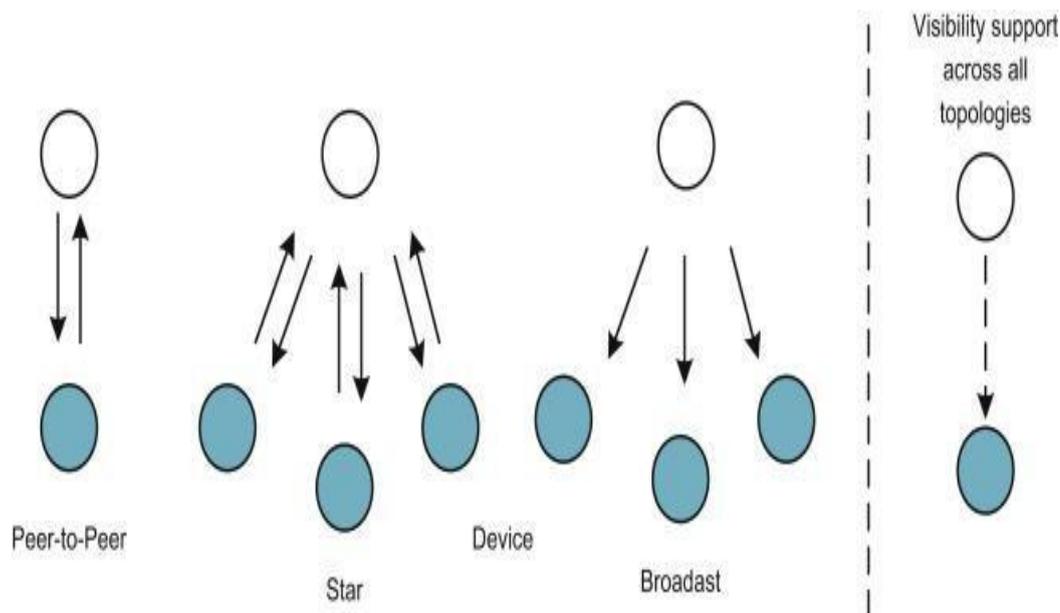


Рисунок 1.5 - Поддерживаемые топологии MAC по IEEE 802.15.7

1.3.2 Физический уровень. Физический уровень обеспечивает физическую спецификацию устройства, а также отношения между устройством и носителем. На рисунке 1.6 показана блок-схема реализации общего физического уровня системы VLC. Прежде всего, входной поток битов пропускается через каналный кодер (необязательно). Линейные блочные коды, сверточные коды и современные турбокоды может быть использован для повышения производительности системы VLC. Затем кодированный битовый поток канала пропускается через линейный кодер, чтобы получить кодированный битовый поток. После линейного кодирования выполняется модуляция (например, ВКЛ-ВЫКЛ, PPM и PWM и т.д.), И, наконец, данные поступают на светодиод для передачи по оптическому каналу. Предлагается дуплексная двунаправленная система VLC, использующая RGB-светодиоды и коммерчески доступный светодиод на основе люминофора в нисходящей и восходящей линиях связи, соответственно. Мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM) и мультиплексирование поднесущих (SCM) используется для достижения двунаправленной передачи. Кроме того, для увеличения скорости передачи данных, было использовано мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM) и квадратурная амплитудная модуляция (QAM). Скорость системы VLC, с данным типом модуляции, была увеличена до 3,75 Гбит/с по сравнению с простейшим типом ВКЛ-ВЫКЛ с нисходящей линии связи 575 Мбит/с и восходящей линии связи 225 Мбит/с. Приемник (например, кремниевый фотодиод и PIN фотодиод) получил оптический сигнал. После демодуляции и линейного декодирования поток битов проходит через каналный декодер для получения выходных битов [2].

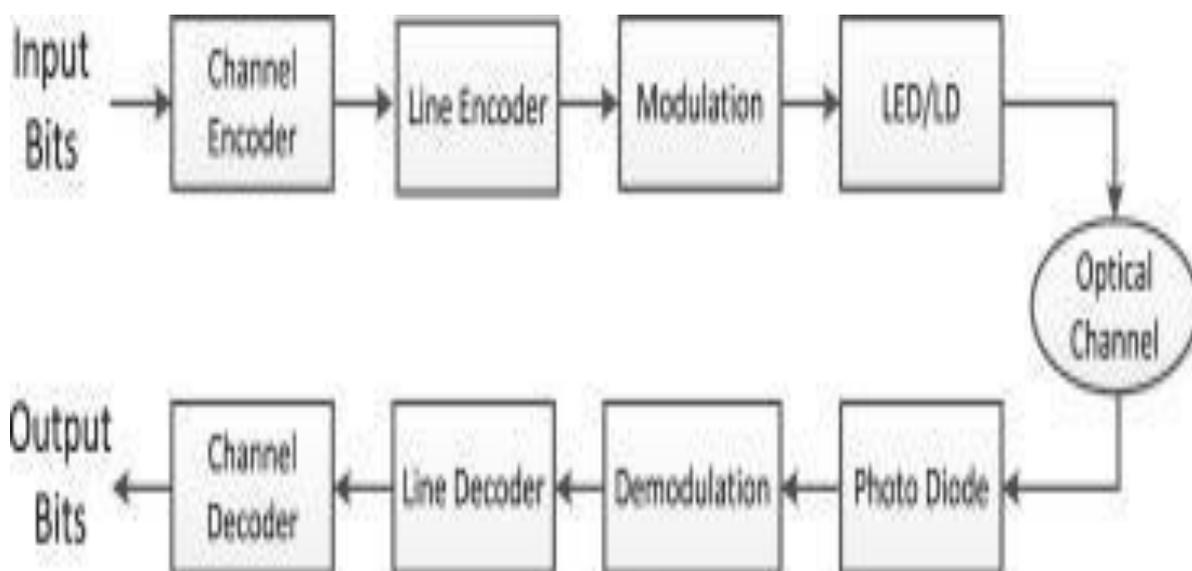


Рисунок 1.6 - Модель системы физического уровня VLC

Три различных типа физической реализации VLC приведены в IEEE 802.15.7. Рабочий диапазон PHY I, PHY II и PHY III составляет 11,67– 266,6 Кбит/с, 1,25–96 Мбит/с и 12–96 Мбит/с соответственно. PHY I использует сверточное кодирование (CC) и кодирование Рида-Солмана (RS) из-за своей конструкции для наружного использования, а PHY II (предназначенный для использования внутри помещений) обеспечивает поддержку кода с ограниченной длиной пробега (RLL) для устранения влияния мерцания и баланса постоянного тока. Различные оптические скорости и скорости передачи данных, обеспечиваемые IEEE 802.15.7, также перечислены в таблице 1.1, таблице 1.2 и таблице 1.3 [2].

Таблица 1.1 - Спецификации режима работы PHY I

Модуляция	Код RLL	Оптическая тактовая частота	Внешний код (RS)	Внутренний код (CC)	Скорость передачи данных
OOK	Манчестер	200 кГц	(15,7)	1/4	11,67
			(15,11)	1/3	24,44
			(15,11)	2/3	48,89
			(15,11)	нет	73,3
VPPM	4B6B	400 кГц	(15,2)	нет	35,56
			(15,4)	нет	71,11
			(15,7)	нет	124,4

Версия Li-Fi PHY-I разработана для удовлетворения требований к низкой скорости передачи данных от 12 до 267 Кбит / с. Идеально используется для наружного применения

Таблица 1.2 - Спецификации режима работы PHY II

Модуляция	Код RLL	Оптическая тактовая частота (МГц)	RS Код	Скорость передачи данных (Мбит/с)
VPPM	4B6B	3,75	RS(64,32)	1,25
			RS(160,128)	2
		7,5	RS(64,32)	2,5
			RS(160,128)	4
			нет	5
OOK	8B10	15	RS(64,32)	6
			RS(160,128)	9,6
		30	RS(64,32)	12
			RS(160,128)	19,2
		60	RS(64,32)	24
			RS(160,128)	38,4
		120	RS(64,32)	48
			RS(160,128)	76,8

Версия Li-Fi PHY-II разработана для удовлетворения умеренных требований к скорости передачи данных от 1,25 Мбит/с до 96 Мбит/с. Идеально подходит для внутреннего применения.

Таблица 1.3 - Спецификации режима работы PHY III

Модуляция	Оптическая тактовая частота(МГц)	FEC	Скорость передачи данных(Мбит / с)	
4 - CSK	12	RS (64, 32)	12	
8 - CSK		RS (64, 32)	18	
4 - CSK	24	RS (64, 32)	24	
8 - CSK		RS (64, 32)	36	
16 - CSK		RS (64, 32)	48	
8 - CSK		нет	72	
16 - CSK		нет	нет	96

Версия LiFi PHY-III разработана для удовлетворения требований скорости передачи данных от 12 Мбит / с до 96 Мбит / с. Он используется в системах, где широко применяются источники цвета на основе RGB и детекторы.

Эксплуатирование светодиодов сделало полупроводниковое освещение развивающейся областью. Светодиоды превзошли источники света накаливания по надежности, энергопотреблению и светоотдаче. Эффективность светодиодов составляет 20 лм/Вт, это в разы больше, чем у ламп накаливания. Светодиоды и лазеры используются в качестве источников передачи для VLC. Белый свет, излучаемый светодиодами и преобразователей длины волны, является одним из привлекательных кандидатов для использования в качестве источника VLC. Существуют различные возможные спектры, в которых свет излучается белым светом. Тетрахроматические, дихроматические и трихроматические

моды, используемые для генерации белого света, показаны на рисунке 1.7. Наиболее часто используемые методы генерации белого света с использованием светодиодов - трихроматические (красный, зеленый и синий). Преимущество использования RGB LED для генерации белого света заключается в высокой пропускной способности, таким образом и получаются высокие скорости передачи данных. Недостатком RGB LED является их высокая сложность и трудности в модуляции. Были приняты различные методы определения характеристик оптического беспроводного канала. Соответствующий светодиод выбирается в зависимости от модели канала.

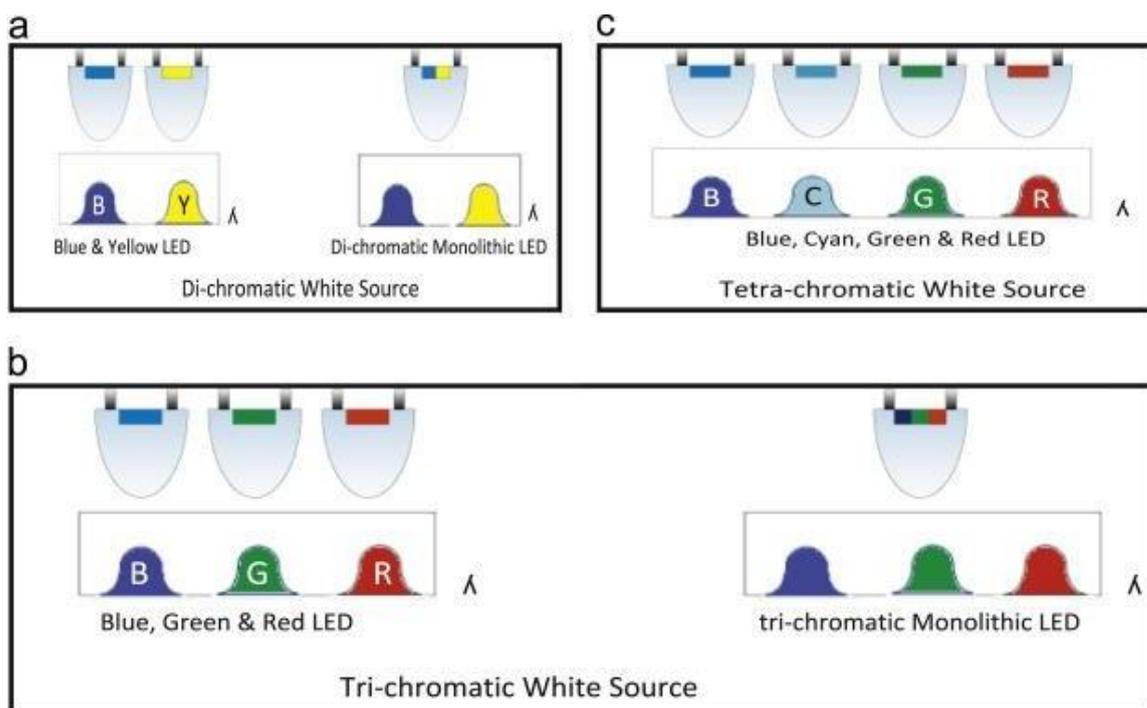


Рисунок 1.7 - Источник белого света на основе светодиодов

#### 1.4 VLC стандартизация

VLC является одним из много обещающих кандидатов для связи из-за быстрого развития полупроводникового освещения. Тем не менее, некоторые проблемы, которые существуют и должны быть решены, перечислены ниже:

- а) интеграция VLC с уже существующими стандартами связи, такими как Wi-Fi и др.;
- б) вопрос о помехах от источников окружающего света;
- в) вопросы обслуживания должны быть должным образом рассмотрены в VLC;
- г) улучшить производительность системы связи, указав схемы прямого исправления ошибок;
- д) в будущем ожидаются помехи между различными устройствами,

используемыми VLC, из-за увеличения количества устройств VLC.

Для решения вышеуказанных проблем необходима стандартизация VLC. Стандартизация VLC была выполнена Консорциумом связивидимого света (VLCC) в Японии и IEEE. Японская ассоциация производителей электроники и информационных технологий (JEITA) создала такие стандарты как: JEITA CP-1221, JEITA CP-1222 и JEITA CP-1223. Однако новейшим считается стандарт 802.15.7 - это стандарт, завершённый IEEE для физического уровня и уровня MAC. Этот стандарт нацелен на:

- а) обеспечение доступа к нескольким сотням ГГц полосы электромагнитного излучения;
- б) обеспечение иммунитета от электромагнитных помех;
- в) связь, которая дополняет услуги для существующей инфраструктуры видимого света;
- г) определение схем FEC, методов модуляции и скоростей передачи данных для связи VLC;
- д) описанию механизмов доступа к каналу, таких как период доступа к конкуренции (CAP), период без конфликтов (CFP) и поддержка видимости при доступе к каналу;
- е) спецификацию уровня PHY, такую как оптическое отображение, время поворота TX-RX, время поворота RX-TX и уменьшение мерцания и затемнения.

IEEE 802.15.7 обеспечивает минимальный эталон для разработки новых продуктов. Три различных класса устройств, рассматриваемых для VLC, являются транспортными средствами, мобильными устройствами и инфраструктурой, как указано в таблице 1.4. Стандарт JEITA CP-1221 направлен на представление необходимых требований и уровня индикации, необходимого для предотвращения помех между различными устройствами VLC. Диапазон длин волн для VLC, принятый JEITA CP-1221, составляет 380–750 нм. JEITA использует частотный диапазон 1 для реализации системы идентификации видимого света, как показано на рисунке 1.8. Инвертор-люминесцентная лампа излучает в диапазоне частот 2, поэтому этот диапазон не подходит для связи VLC. Частотный диапазон 3 используется для высокоскоростной передачи данных. В JEITA CP-1222 используется частота несущей 28,8 кГц со скоростью передачи 4,8 кбит/с. Для исправления ошибок использовалась циклическая проверка избыточности [4].

Таблица 1.4 - Классификация устройств IEEE 802.15.7

Тип	Городская инфраструктура	Мобильные устройства	Транспорт
Фиксированные координаты	да	нет	нет
Источник питания	мобильный	ограниченный	умеренный
Источник света	интенсивный	слабый	интенсивный
Физическая мобильность	нет	да	да
Дальность	Большая/Малая	Малая	Большая
Скорость передачи данных	Высокая/низкая	Высокая	Низкая



Рисунок 1.8-Распределение частоты поднесущей, используемая JETTA

## 1.5 Методы модуляции VLC

Модуляция в VLC отличается от радиочастотной связи из-за не кодирующей особенности информации по фазе и амплитуде светового сигнала. Поэтому ясно, что мы не можем использовать амплитудную и фазовую модуляцию в случае VLC. Модуляция в VLC достигается с помощью вариаций интенсивности света, соответствующих информации в сигнале сообщения.

Два фактора, которые необходимо учитывать при разработке схемы модуляции для VLC, включают в себя:

- а) затемнение;
- б) мерцание.

Различные виды деятельности требуют разной освещенности, например 30–100 люкс требуются для обычной визуальной деятельности в общественных местах. Существует нелинейная связь, показанная на рисунке.

1.9. Между измеренным светом и воспринимаемым светом, их соотношение определяется выражением:

$$\text{Воспринимаемый свет} = 100 \sqrt{\frac{\text{измеренный свет}}{100}} \quad (1.1)$$

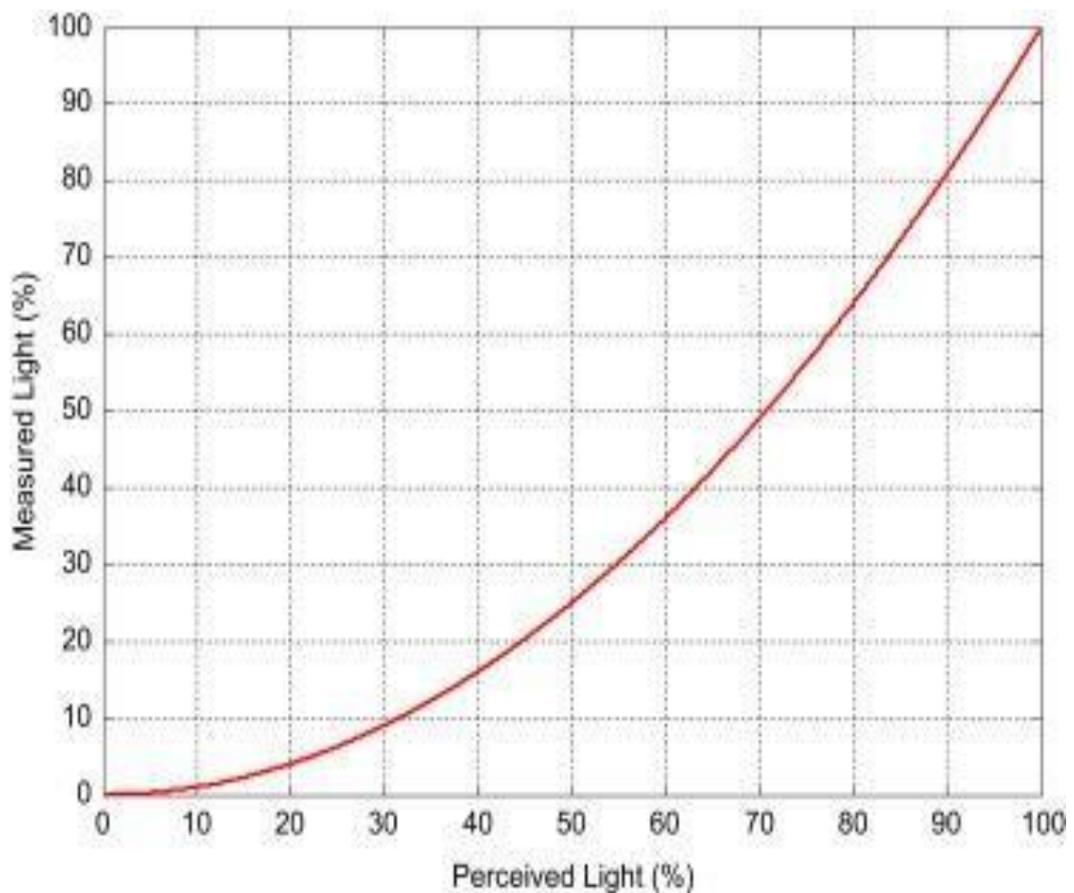


Рисунок 1.9 - Отношение измеряемого света к воспринимаемому

Изменения в яркости модулированного света должны быть выполнены таким образом, чтобы он не приводил к воспринимаемым человеческим глазом колебаниям. Согласно IEEE 802.15.7 переключение должно выполняться со скоростью, превышающей 200 Гц, во избежание вредных воздействий.

1.5.1 Включение-выключение (ООК). ВООК светодиоды выключаются и включаются в соответствии с битами в потоке. Например 1 представлен включенным состоянием, а 0 представлен выключенным состоянием. В режиме ООК светодиод не выключается полностью в выключенном состоянии, но выполняется снижение уровня интенсивности.

Основным преимуществом использования ООК является его простота реализации. В более ранних работах VLC, использующий двухпозиционный ключ, был выполнен с использованием белых светодиодов (комбинация синего излучателя и желтого люминофора); однако это страдало от ограничения низкой пропускной способности из-за медленного времени отклика желтого люминофора. Скорость передачи данных 10 Мбит/с была продемонстрирована с использованием NRZ (без возврата к нулю) ООК с белым светодиодом. Комбинация аналогового выравнивания с синей фильтрацией была сделана для увеличения скорости передачи данных до 125 Мбит/с соответственно [5].

1.5.2 Методы импульсной модуляции (PWM, PPM, MPPM). Ограничением ООК являются низкие скорости передачи данных, что побудило

исследователей разработать новые методы модуляции с более высокими скоростями передачи данных.

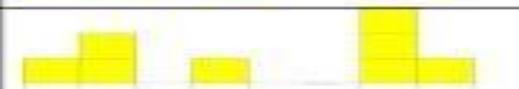
Модуляция Ширины Импульса (Pulse Width Modulation, PWM) изменяется в зависимости от уровня затемнения. Используя высокую частоту PWM, можно достичь разных уровней диммирования от 0% до 100%. Ограничением PWM является низкая скорость передачи данных, которая была до 4,8 Кбит/с. PWM был объединен с Discrete Multitone (DMT) для совместной связи и управления диммированием для достижения скорости передачи данных выше, чем ранее.

Импульсная модуляция положения (PPM) была основана на положении импульса. В случае PPM присутствует только один импульс в каждом периоде символа, но он страдает от проблемы низкой скорости передачи данных; другие варианты PPM были разработаны с течением времени, как показано на рисунке 1.11.

Много импульсный PPM (MPPM) был введен, делая PPM более спектрально эффективным, используя передачу нескольких импульсов в каждом символе-времени.

Ехрurgated PPM (EPPM) является модифицированной версией PPM, которая была введена для улучшения производительности систем связи с ограниченной мощностью.

Много уровневая EPPM (MEPPM) была введена для спектральной эффективности PPM, потому что спектральная эффективность MPPM и EPPM была меньше 1. Таблица 1.5 иллюстрирует сравнение различных методов импульсной модуляции.

Modulation	Transmitted Pattern	Number of Symbols
PPM		$Q$
MPPM		$\binom{Q}{K}$
EPPM		$Q$
MEPPM		$\binom{Q+N}{N}$

Q = Time slots      N = Number of Levels

Рисунок 1.10 - Схема на основе положения импульса с Q временными интервалами и N уровням

Таблица 1.5 - Сравнение методов модуляции

Техника модуляции	Поддержка затемнения	Спектральная эффективность	Мерцание	Восприимчивость к нелинейности
-------------------	----------------------	----------------------------	----------	--------------------------------

				светодиодов
MPPM	да	<1	Низкое	Низкая
EPDM	да	<1	Низкое	Низкая
MEPPM	да	2-3	Очень низкое	Низкая

1.5.3 Переключение цветов (CSK). CSK был предложен в IEEE 802.15.7 для повышения скорости передачи данных, которая была низкой в других схемах модуляции. Способность к переключению замедляется, создавая белый свет с использованием желтого люминофора и синих светодиодов. Поэтому альтернативным способом получения белого света является использование трех отдельных светодиодов, таких как зеленый, синий и красный. Модуляция в CSK выполняется с использованием интенсивности трех цветов в светодиодном источнике RGB. CSK зависит от диаграммы цветности цветового пространства. Он отображает все воспринимаемые глазом цвета на два параметра цветности, таких как  $x$  и  $y$ . 6 иллюстрирует видимую человеку длину волны семи полос с центрами, отмеченными на рисунке 1.11.

Таблица- 1.6 Центр, код и координаты цветности, используемые семью полосами, используемыми в CSK

Полоса (нм)	Код	Центр (нм)	( $x, y$ )
380-478	000	429	(0,169, 0,007)
478-540	001	509	(0,011, 0,733)
540-588	010	564	(0,402, 0,597)
588-633	011	611	(0,669, 0,331)
633-679	100	656	(0,729, 0,271)
679-726	101	703	(0,734, 0,265)
726-780	110	753	(0,734, 0,265)

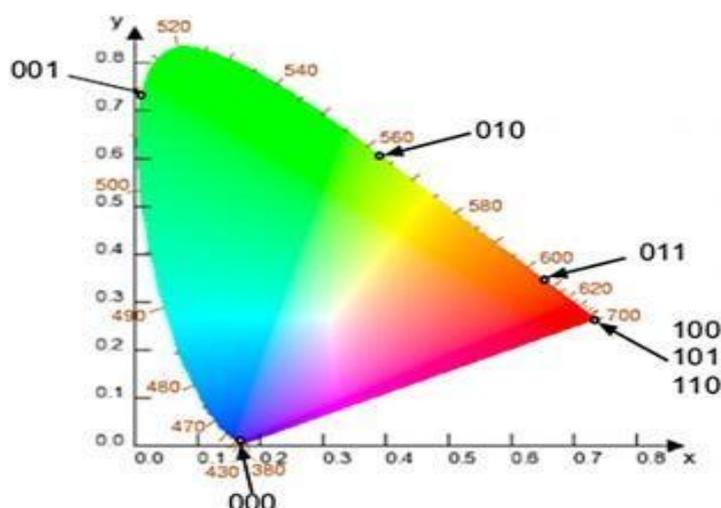


Рисунок 1.11-Диаграмма цветности

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Методы цифровой модуляции классифицируются на основе

характеристик компактности полосы пропускания. Эффективность каждого метода модуляции оценивается путем оценки вероятности ошибки на основе предположения о наличии или отсутствии белого гауссовского шума (AWGN). Схемы модуляции, которые способны передавать большое количество битов на символ с меньшей ошибкой, имеют лучшую устойчивость к шуму и помехам. Для цифровой модуляции доступны различные методы: ASK, FSK, PSK и QAM. OFDM - это эффективный метод модуляции, который обеспечивает более высокую степень пропускной способности, посылая одновременно несколько независимых QAM-поднесущих. Для проектирования надежной системы должны быть выбраны соответствующие параметры OFDM, чтобы избежать влияния межсимвольных помех (ISI) и межнесущих помех (ICI). Спектр OFDM сигнала показан на рисунке 1.12.

OFDM - это процесс кодирования потоков цифровых данных на нескольких несущих. Это метод модуляции, который обеспечивает более высокие скорости передачи данных. OFDM состоит из нескольких частот поднесущих, ортогональных (то есть перпендикулярных) друг другу. Ортогональность гарантирует, что поднесущие разнесены таким образом, чтобы иметь только частичное перекрытие, по скольку пик каждой поднесущей находится на пересечении нуля другой соседней поднесущей. Что бы избежать помех в OFDM, защитные полосы помещаются между несколькими несущими.

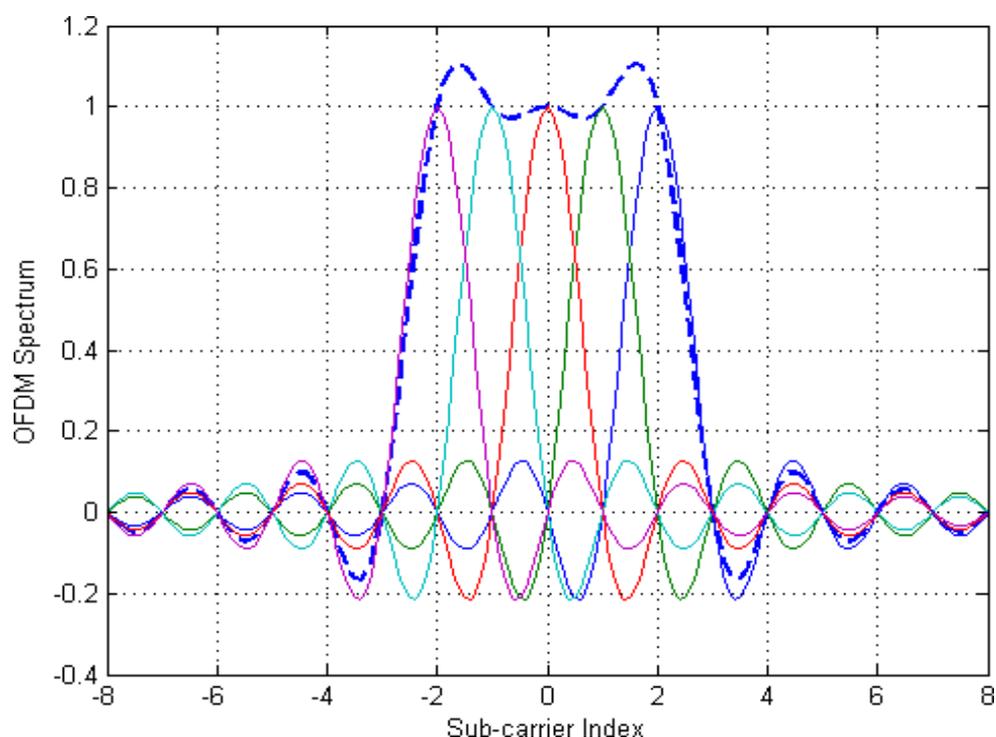


Рисунок 1.12 - Спектр OFDM сигнала

OFDM использует функцию обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT) для модуляции или мультиплексирования и функцию быстрого преобразования Фурье (FFT) для демодуляции или демультимплексирования. Он

используется в оптической системе передачи для преодоления хроматической дисперсии (CD) и дисперсии поляризационных мод (PMD). В OFDM поток данных распределяется по различным каналам NB на разных частотах, чтобы исключить ISI, а также смягчить влияние ICI. OFDM также используется для преобразования высоко скоростного последовательного потока данных в несколько параллельных потоков с низкой скоростью передачи данных. Тем самым он обеспечивает компактный спектр. Следовательно, требование полосы пропускания системы OFDM намного меньше, чем в обычной системе FDM для тех же скоростей передачи данных[4].

## 1.6 Открытые проблемы исследования VLC

Мерцание - это колебания, замечаемые людьми при быстром изменении яркости света. В VLC модуляция светодиодов должна выполняться таким образом, чтобы избежать мерцания из-за его вредного воздействия на здоровье человека. Мерцание бывает либо межкадровым, либо внутри кадрowym мерцанием, в зависимости от характера яркости вариаций. Внутрикадровое мерцание происходит из-за разницы в яркости между битами в кадре, в то время как межкадровое мерцание происходит из-за разницы в яркости между периодом просто я и периодом передачи кадра пакета. В PWM рабочий цикл последовательности импульсов настраивается на управление яркостью; однако мерцание становится более заметным в случае медленной скорости передачи данных и большого периода просто я по сравнению с периодом данных. Поэтому разработка усовершенствованных методов модуляции должна уменьшить мерцание, и она является активной областью исследований.

Различные уровни освещенности требуются для выполнения различных действий, 30–100 люкс, которые требуются для выполнения задач в обычных местах, и более высокая освещенность до 1000 люкс в офисах. Поэтому алгоритмы диммирования должны быть спроектированы таким образом, чтобы выполнялась требуемая освещенность в конкретном месте.

Эффективность различных схем канального кодирования должна быть исследована в VLC. Поскольку пропускная способность очень высока, в VLC для получения более высокой производительности следует использовать турбокоды с высоким порядком памяти. Различные алгоритмы декодирования (такие как Maximum A Posteriori (MAP), Log-MAP и Max-Log MAP) для компонентных декодеров должны быть протестированы и оценены. Линейные блочные коды, такие как (23,12,7) код Голя, также могут использоваться в VLC для повышения производительности.

Изучение производительности различных фотодиодов в VLC также является открытой областью исследований. В VLC могут использоваться различные фотодиоды, такие как кремниевые фотодиоды, PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды. Их следует выбирать учитывая производительность, сложность и стоимость. Лавинные фотодиоды имеют высокий коэффициент усиления, в то время

как PIN-диоды, с другой стороны, отличаются низкой стоимостью, большей активной площадью и хорошими характеристиками в сценариях с высоким уровнем шума.

Длительный пробег нулей и единиц приводит к мерцанию, поэтому такой тип кодов должен быть разработан таким образом, чтобы предотвратить длительный запуск нулей и единиц исследователно, избежать мерцания в VLC.

Шум от источников окружающего света ухудшает производительность системы VLC. Манчестерское кодирование использовалось для уменьшения фонового шума без использования адаптивного мониторинга и обратной связи. Различные методы предложены для уменьшения фонового шума. Кодирование Адамара и Манчестерское кодирование также использовались для его уменьшения. Схемы канального кодирования, такие как линейные блочные коды, сверточные коды и турбокоды могут быть использованы для повышения производительности системы VLC. Турбокоды имеют лучшую производительность, чем линейные блочные и сверточные коды, но за счет больших накладных расходов и сложности, связанных с декодером. Следовательно, раз полоса пропускания в VLC высока, предпочтительно использовать турбокоды. Таким образом, это открытая область исследований, в которой должны быть предложены новые коды для более эффективного снижения шума, чем ранее использовавшиеся методы.

## 2 Анализ оборудования на основе VLC

### 2.1 Выбор оборудования на основе VLC

Хоть технология Li-fi и является инновацией, на сегодняшний день множество компаний по всему миру создают и эксплуатируют оборудование на основе VLC. На современном рынке представлено большое количество устройств, отвечающих за прием, передачу и модуляцию светового сигнала. Остается только выбрать конкретное оборудование под определенные цели и задачи.

Основными брендами, предоставляющими Li-Fi оборудование, являются:

- а) Purelifi - Эдинбург, Шотландия;
- б) Vncomm – Шарлотсвилл, США;
- в) Phillips\ Truelifi – Амстердам, Нидерланды.

Шотландская компания «PureLiFi» представила оборудование для работы в системе Li-Fi под названием «LiFi-X» на всемирном мобильном конгрессе (Барселона, 27 февраля – 2 марта 2017 г.). Данное оборудование состоит из двух устройств: LiFi-X Access Point и LiFi-XC Station показанных на рисунке 2.1.

В настоящее время «PureLiFi» работает только с организациями корпоративного уровня для развертывания решений Li-Fi и не продает свое устройство частным лицам.

Американская компания Vncomm уже имеет большой выбор и спецификацию lifi оборудования, от уличных осветительных фонарей до настольных светильников. В 2019 году компания представила новую разработку “LUMINEX”. Она представляет собой LED панель и мобильный USB приемник “Lumistick” показанных на рисунке 2.2.



Рисунок 2.1 - Li-fi X Access Point и Li-fi XC station



Рисунок 2.2 - Vncomm Luminex и Lumistick

Нидерландская транснациональная компания Phillips выпускает VLC оборудование под брендом “TrueLiFi”. Их передовой серией является TrueLiFi-6002 показанна на рисунке 2.3. Он включает в себя LiFi адаптер, ИК-трансивер, приемный модуль и модем.

Технические характеристики оборудования на основе VLC.

Данные устройства хоть и имеют схожий принцип работы, но отличаются по функционалу, техническим характеристикам, финансовым затратам, местам эксплуатации и т.д. Основные характеристики данных устройств приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3 [3].



Рисунок 2.3-Signify-серия TrueLiFi 6002 Таблица

Таблица 2.1-Технические характеристики Li-Fi X от Purelifi

Параметр	Значение	Единица измерения
Напряжение питания	12	В
Режим передачи	дуплекс	-
Скорость нисходящей линии связи (макс.)	430	Мбит\с
Скорость восходящей линии (макс.)	310	Мбит\с
Разъем питания	10-контактный Micro-Fit 3.0	-
Разъем приема\передачи данных	Gigabit Ethernet Port	-
Потребляемая мощность в стандартном режиме	4	Вт
Максимальная потребляемая	8	Вт

мощность		
Максимальная потребляемая мощность(Station)	2.5	Вт
Время задержки	0.6	мс
Площадь покрытия	40	м <sup>2</sup>
Много пользовательская возможность	8 пользователей	-
Удаленное управление	TR-069, SNMP, v3	-
Размер(А.Р\Station)	88 x 88 x 20 85 x 29.4 x 10.2	мм
Вес(А.Р\Station)	200\85	гр
Рабочая температура	0 - 35	° С
Влажность (без конденсации)	20 - 95	%
Установка различных LED светодиодов	Да	-
Передача данных(Station)	USB 2.0	-
Цена	1290	\$

Таблица 2.2 - Технические характеристики Vlncomm LumineX и Lumistick

Параметр	Значение	Единица измерения
Напряжение питания	110 - 230	В. Переменного тока
Режим передачи	полудуплекс	-
Скорость нисходящей линии связи (макс.)	600	Мбит\с
Скорость восходящей линии (макс.)	420	Мбит\с
Разъем питания	10-контактный Micro-Fit 3.0	-
Разъем приема\передачи данных	Gigabit Ethernet Port	-
Потребляемая мощность в Стандартном режиме	30	Вт
Максимальная потребляемая мощность	35	Вт
Максимальная потребляемая мощность (Lumistick)	3	Вт
Время задержки	0.4	мс
Площадь покрытия	50	м <sup>2</sup>
Много пользовательская возможность	15 пользователей	-
Удаленное управление	TR-069, SNMP, v3	-
Размер (LumineX\ Lumistick)	550 x 550 x 73 90 x 35 x 10	мм
Вес(А.Р\Station)	890\110	гр
Рабочая температура	-10 - 40	° С
Влажность (без конденсации)	10 - 95	%
Установка различных LED светодиодов	Нет	-
Разъем передачи данных(Lumistick)	USB C	-
Цена	2090	\$

Таблица 2.3 - Технические характеристики Signify True Li-Fi 6002

Параметр	Значение	Единица измерения
----------	----------	-------------------

Напряжение питания	12	В
Режим передачи	по лудуплекс	-
Скорость нисходящей линии связи (макс.)	300	Мбит\с
Скорость восходящейлинии (макс.)	150	Мбит\с
Разъем питания	RJ 12 (питание и данные)	-
Разъем приема\передачи данных	RJ 12 (питание и данные)	-
Потребляемая мощность в Стандартном режиме	25	Вт
Максимальная потребляемая мощность	30	Вт
Максимальная потребляемая мощность(Transceiver)	3	Вт
Время задержки	0.8	мс
Площадь покрытия	45	м <sup>2</sup>
Удаленное управление	TR-069, SNMP, v3	-
Размер (Access Point\Transceiver)	130x 55 x 60 80 x 15 x 12	мм
Вес (A.P\ Transceiver)	150\90	гр
Рабочая температура	0 - 35	° С
Влажность (без конденсации)	10 - 95	%
Установка различных LED светодиодов	Нет	-
Разъем передачи данных	USB C	-
Цена	1500	\$

Отсюда следует что оптимальным устройством для данной рабты является Li-fi X Access Point и Li-fi XC station так как оно более подходит пофинансовым расходам, наличию кастомизации LED светодиодов и техническими параметрами.

## 2.2 Передающий модуль LiFi-X Access Point

LiFi-X Access Point представляет собой устройство для генерации сигнала. Именно оно модулирует и создает «мерцание» LED-светильников и отвечает за принятие обратного сигнала. Li-fi X Access Point не имеет встроенного LED светодиода, наоборот он предназначен для модуляции сигнала различных светодиодов подключенных к нему. Структурная схема передающего модуля показана на рисунке 2.4 [3].

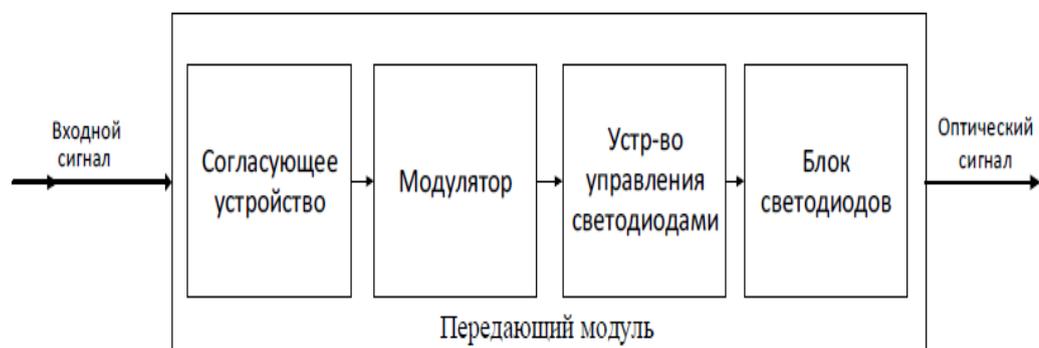


Рисунок 2.4 - Структурная схема передающего модуля Li-fi X Access Point

Для анализа особенностей внедрения системы VLC (Li-fi) выбрано помещение длиной 18 метров, шириной 12 метров и высотой 3.4 метра. На современном рынке существует огромное множество светодиодов различного типа с разными характеристиками. В качестве оптического передатчика используется светодиодный модуль SP-02-W4, представленный на рисунке 2.5, который оснащен 7 светодиодами LXML-PWC1-0120 холодного белого цвета, припаянными к круглому основанию Sink PAD-II 40 мм. Технические характеристики светодиода SinkPAD-II представлены в таблице 2.4 [11].

Таблица 2.4 - Технические характеристики светодиода SinkPAD-II

Параметр	Значение
Цвет светодиода	белый
Минимальное количество люмен при 350мА	540
Стандартное количество люмен при 700мА	800
Стандартная длина волны	6500К
Диапазон длин волн	От 4500К до 10000К
Угол луча	120°
Диапазон рабочих температур в° С	От -40 до 135
Размеры Д x Ш x В в мм	40 x 40 x 3.7
Цена	18.6\$

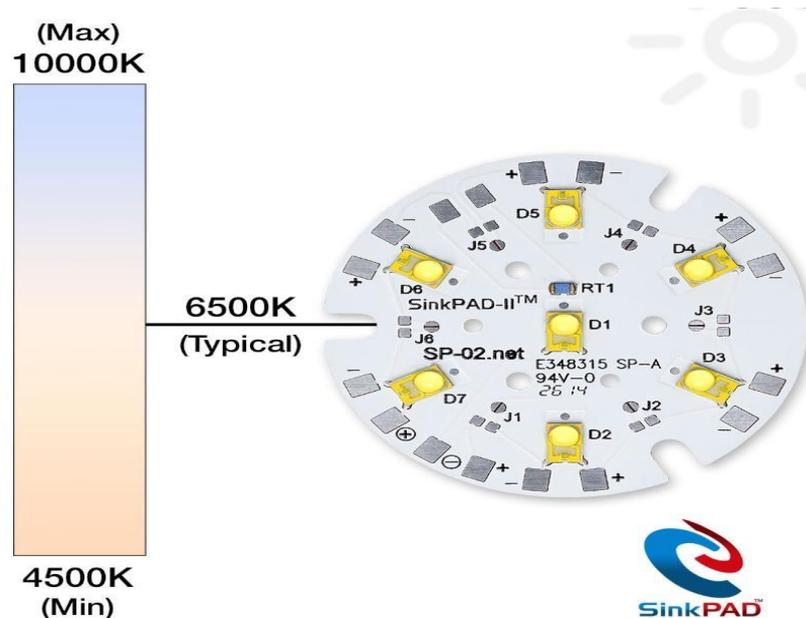


Рисунок 2.5 - Светодиодный модуль SinkPAD-II

В данной конструкции светодиодов на передающей стороне можно применить различные конфигурации использования, а именно:

- одного информационного светодиода в составе неинформационных;
- массива информационных светодиодов;
- блока светодиодов различных цветов.

В данной работе светодиоды в световом модуле будут установлены последовательно и являться массивом информационных светодиодов для улучшения качества передаваемого сигнала. Их мощность позволяет обойтись без дополнительных источников освещения.

### 2.3 Приемный модуль Li-fi XC

За последние семь лет PureLiFi выпустила ряд продуктов в Li-Fi, таких как Li-1st, Li-Flame и Li-X. Их самый последний продукт - Li-Fi XC. Он в три раза меньше ключа Li-Fi X и обеспечивает легкую, высоко скоростную, безопасную и полностью сетевую беспроводную связь с помощью света. Это первая в мире сертифицированная система Li-Fi. Он совместим с устройствами USB 2.0 и поддерживает операционные системы Windows 10, Windows 8, Windows 7, Linux и Mac. Он способен поддерживать скорость восходящей линии связи до 310 Мбит/с. Структурная схема приемного модуля Li-fi XC представлена на рисунке 2.6.

На приемной стороне используется кремниевый фотодиод с большой площадью VTD31AAN по казаный на рисунке 2.7. Данный фото приемник устанавливается непосредственно под передающим светодиодом в защитном корпусе LiFi-XC для обеспечения мобильности и приема передачи сигнала. Его технические характеристики представлены в таблице 2.5.

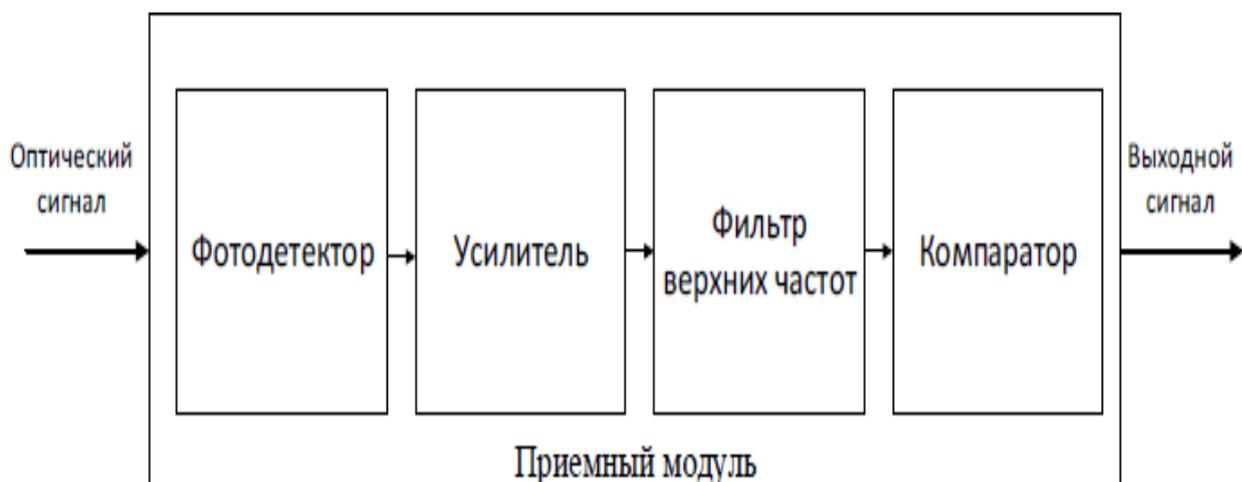


Рисунок 2.6 - Структурная схема приемного модуля Li-fi XC

Таблица 2.5 - Технические характеристики кремниевого фотодиода VTD31AАН

Параметр	Значение
Фото чувствительный диаметр	5.6 x 5.6 мм
Диапазон длин волн	400 – 1200 нм
Спектральный шумовой ток	$1.4 \text{ нА} \sqrt{\text{Гц}}$
Чувствительность при 780нм	0.7 А/Вт
Емкость	60 пФ
Время отклика	2 нс
Темновой ток	5 нА



Рисунок 2.7 - Кремниевый фотодиод с большой площадью VTD31AАН

Для вычисления максимального расстояния, на котором передача сигнала будет происходить с приемлемым коэффициентом ошибок, нужно учесть характеристики используемого оборудования представленные в таблице 2.6, а также эффекты рассеивания и поглощения видимого света в атмосфере. Для удовлетворения условия требуется, чтобы отношение эффективного напряжения

полезного сигнала к эффективному напряжению шумаприемника (сигнал\шум) для цифровых систем было выше 6 дБ [4].

Таблица 2.6 - Основные параметры оптического передатчика и приемника

Параметр	Значение
Мощность оптического передатчика (1 светодиода из их массива)	220мВт x 7шт
Полоса пропускания	20 ТГц
Рабочая длина волны	780нм
Токовая чувствительность фотодиода	0,96 А\Вт
Шумовой ток фотодетектора	0,014 пА\Гц

Подставив значения чувствительности фотодетектора и шумового тока, Можно вычислить внутренние шумы приемника

$$P_{\text{шум}} = \frac{0,014 \cdot 10^{-12} \frac{\text{А}}{\text{Гц}} \cdot 20 \cdot 10^{12} \text{Гц}}{0,96 \cdot \frac{\text{А}}{\text{Вт}}} = 0,29(\text{Вт})$$

Тогда для мощности сигнала, требуемой на входе приемного модуля для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум, можно записать как

$$P_{\text{сигнал}} = (10^{SNR/10}) \cdot P_{\text{шум}} \quad (2.2)$$

$$P_{\text{сигнал}} = (10^{6\text{дБ}/10}) \cdot 0,29 \text{ Вт} = 0,72 \text{ (мВт)}.$$

Данный передатчик излучает сигнал мощностью 1,54 Вт, а минимально допустимое значение на входе приемника должно быть не ниже 0,72 Вт. С помощью закона Ламберта – Бера, можно вычислить предельное расстояние D, позволяющее обеспечить допустимое затухание:

$$K = e^{-(K_{\text{атм}} \cdot D)} \quad (2.3)$$

где K – коэффициент затухания;

D – расстояние;

$K_{\text{атм}}$  – показатель поглощения атмосферы.

В рассматриваемом случае показатель поглощения связан с длиной волны излучения 780нм и безразмерным показателем поглощения в атмосфере, равным 75 дБ

$$K_{\text{атм}} = \frac{4\pi k}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot 75\text{дБ}}{780 \text{ нм}} = 0,56\% \quad (2.4)$$

Подставив значения, выразим D из формулы (1.3)

$$D = -\frac{(\ln K)}{K_{\text{атм}}} = -\frac{(\ln 0,09)}{0,56} = 4,3(\text{м})$$

При установке всех фото приемных устройств на поверхности стола (высоту стола брать равной 1м), а максимальное расстояние, которое может пройти сигнал без критического затухания  $D=4,3$  метра, можно найти площадь покрытия 1 светодиодного передатчика LiFi-X Access Point по формуле

$$S = \pi \cdot R = \pi \cdot (D^2 - L^2), \quad (2.5)$$

где  $L$  – длинна нормали от передатчика к приемнику.

Подставив все значения в формулу (2.5) получим

$$S = \pi \cdot (4,3^2 - 2,4^2) \approx 40(\text{м}^2).$$

Так как площадь исследуемого помещения равна  $216\text{м}^2$ , а один светодиод способен покрыть площадь в  $40\text{м}^2$ , то для данного помещения следует установить 6 оптических передатчиков как показано на рисунке 2.8.

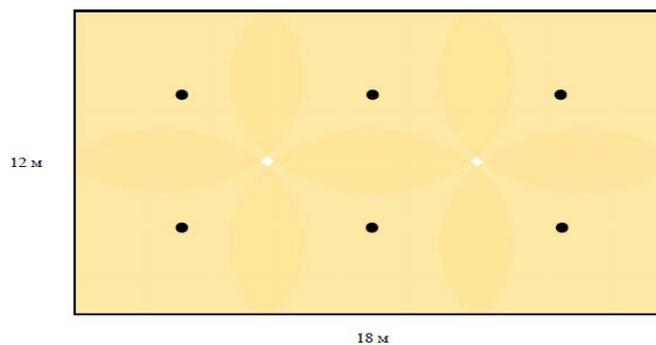


Рисунок 2.8 - Зона покрытия помещения информационного оптического излучения

## 2.4 Программирование

При проектировании беспроводной сети Li-fi была разработана программа расчета полосы пропускания светодиодов для удобства проведения расчетов. Программа разработана на языке Delphi 7.

Вид программы расчета полосы пропускания светодиодов представлен на рисунке 2.9. Код показан в приложении А.



Рисунок 2.9 - Вид программы расчета полосы пропускания свето диодов

## 2.5 Усиление Интернета вещей с использованием световой связи и распределенных крайних вычислений

С быстрым ростом количества подключенных устройств возникают новые проблемы, которые будут решены путем увеличения пропускной способности, повышения энергетической эффективности, улучшения использования спектра и снижения затрат, а также предложения улучшенной масштабируемости для обработки растущего числа связанных устройств. Это можно достичь за счет внедрения новых технологий в традиционные сети Интернета вещей (IoT). Связь видимым светом (VLC) — это перспективная технология, позволяющая двунаправленную передачу данных в видимом световом спектре, обеспечивая множество преимуществ, включая ультравысокую скорость передачи данных, ультратонкую задержку, высокую спектральную эффективность и ультравысокую надежность. Light Fidelity (LiFi) — это форма VLC, представляющая собой эффективное решение для множества приложений и случаев использования IoT, включая внутренние и внешние применения. Распределенные вычисления на краю сети — это еще одна технология, которая может помочь в коммуникациях в IoT-сетях и обеспечить плотное размещение IoT-устройств. В этой работе рассматривается проектирование общей структуры для IoT-сетей с использованием LiFi и схемы распределенных вычислений на краю. Целью является обеспечение плотного размещения, увеличение надежности и доступности, а также снижение задержки связи в IoT-сетях. Для удовлетворения этих требований предложенная архитектура использует MEC и облачные вычисления на краю. Для ситуаций с плотным размещением представлена концепция доказательства созданной модели. Модель fog-MEC с

интеграцией LiFi протестирована в различных условиях, и результаты показывают, что модель эффективна.

Интернет вещей (IoT) — это новая коммуникационная система, которая рассматривает подключение различных распределенных беспроводных устройств и предоставляет коммуникационную среду для взаимодействия между удаленными машинами. Она позволяет осуществлять парадигму связи "машина-машина" (M2M), введенную для обеспечения взаимодействия между машинами, например, сенсорами и актуаторами. Количество подключенных к Интернету устройств увеличилось с 5 миллионов до миллиардов всего за один год. Ожидается, что к 2025 году количество подключенных устройств на один квадратный километр будет в 20 раз больше, чем текущее количество, что создаст увеличение доходов в 10 раз по сравнению с нынешними показателями.

IoT предоставил неживой физической среде цифровую нервную систему. В последнее время IoT стал широко распространенным, продемонстрировав свои возможности в различных приложениях — от автоматизированных автомобилей и носимых устройств до умных домов и городов, оказывая глобальное влияние. В настоящее время более 25 миллиардов устройств подключены к IoT, создавая поток информации, который необходимо отслеживать и анализировать. В результате устройства обучаются и улучшаются на основе доступных наборов данных без какого-либо вмешательства. Так IoT-устройства становятся умными.

Связь является важным компонентом в проектах IoT. Заинтересованные стороны должны определить наиболее подходящую модель подключения для своих проектов и продуктов. Существуют более 30 коммерчески доступных вариантов подключения IoT, и выбор может быть сложным, учитывая их постоянное развитие. Гетерогенные сети IoT применяют либо технологии коротковолновой, либо длинноволновой связи. Однако такие интерфейсы связи не соответствуют требованиям сетей IoT, включая энергоэффективность, пропускную способность, надежность, доступность и латентность.

Связь видимым светом (VLC) — это перспективная технология, которая может быть внедрена в IoT-сети для преодоления указанных выше проблем. Light Fidelity (LiFi) — это революционная технология, позволяющая быстро передавать большие объемы данных. Это форма VLC, которая обеспечивает эффективную среду для достижения ультравысокой надежности и доступности, низкой латентности и повышенной энергетической эффективности для приложений IoT. Отрасль LiFi уже превратилась в жестко конкурентный рынок, на котором несколько крупных компаний и лидеров отрасли борются за долю рынка. На рынке уже доступны множество решений с соответствующими размерами и интеграцией, что упрощает внедрение этой технологии в IoT-сети.

Переход от централизованных облачных вычислений к распределенным вычислительным парадигмам приносит множество преимуществ для коммуникационных сетей, включая снижение задержки связи, введение новых услуг, увеличение спектральной эффективности, повышение доступности сети и уменьшение загрузки основной сети. Распределенные технологии на краю сети развертывают распределенные серверы на краю сети доступа, вместо одного

удаленного централизованного сервера, который должен иметь интерфейс через основную сеть. Такие распределенные серверы имеют интерфейсы к удаленному централизованному облаку.

Ограниченные вычислительные ресурсы IoT-устройств являются вызовом, который можно решить с помощью технологии распределенных вычислений на краю, например, облачных вычислений на краю и многопользовательских вычислений на краю (MEC). С помощью распределенной облачной модели предприятия снижают загрузку сети, задержку и риск потери данных. Кроме того, предприятия могут лучше гарантировать соответствие требованиям целостности данных, поскольку данные могут храниться в стране их создания. Распределенное облако — это способ иметь хранение, аккаунты и сети в небольшом облаке, которое существует вне основного облака. Создание распределенного облака приближает вычисления к конечному пользователю, позволяя обрабатывать данные в реальном времени, снижая время отклика и повышая безопасность. Примеры распределенных облаков включают облачные вычисления на краю и облачные вычисления. MEC является стандартом архитектуры для облачных вычислений на краю, в то время как облачные вычисления на краю являются общим набором для облачных вычислений.

В этой работе рассматривается проектирование и разработка общей структуры для IoT-сетей с использованием LiFi и схемы распределенных вычислений на краю. Целью является обеспечение плотного размещения, увеличение надежности и доступности, а также снижение задержки связи в IoT-сетях. Вводится многоуровневая распределенная модель на основе fog-MEC. Для ситуаций с плотным размещением представлена концепция доказательства созданной модели. Основные вклады работы суммированы следующим образом.

1. Проектирование и разработка IoT-сети на основе LiFi.
2. Проектирование и разработка модели fog-MEC для обеспечения вычислительных ресурсов на краю IoT-сетей на основе LiFi.
3. Оценка производительности разработанной модели IoT на основе LiFi в различных сценариях.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы рассмотрим некоторые исходные данные и связанные работы. Раздел 3 описывает предложенную сеть IoT на основе fog-MEC с использованием LiFi. В разделе 4 представлены результаты оценки и обсуждаются выводы для проверки созданной модели. В разделе 5 обсуждаются заключения и рекомендации на будущее.

### 2.5.1 LiFi для IoT-сетей

LiFi решает задачу внутреннего беспроводного доступа в качестве первого случая использования; однако с недавними достижениями в области коммуникационных систем и текущими потребностями были введены многие новые случаи использования. Среди этих случаев использования IoT представляет собой многообещающий вариант. Группа стандартов IEEE 802.11bb упомянула восемь предполагаемых случаев использования и классифицировала

связанные с ними среды, приложения и условия передачи данных. Основными случаями использования были определены промышленные беспроводные сети, беспроводной доступ в медицинских учреждениях, корпоративные сети и защищенные домашние сети. Более того, группа стандартов определила вторичные случаи использования, включая связь "автомобиль-автомобиль" (V2V), связь между транспортными средствами и уличными единицами, то есть связь "транспортное средство-инфраструктура" (V2I), обратную связь и подводную связь.

Эти основные и вторичные случаи использования в основном применяют парадигму IoT, и LiFi может быть внедрён для содействия связи в сетях на основе IoT. LiFi является эффективным решением для многих приложений и случаев использования IoT, включая внутренние и внешние применения. Мы можем перечислить некоторые из таких приложений в следующих пунктах:

- Промышленный IoT (IIoT): IIoT требует надёжной связи с очень низкой латентностью и высокой системой доступности и надёжности. Это можно достичь, внедрив связь видимым светом в эти системы с использованием распределённой модели на краю. LiFi может обеспечить надёжную сетевую связь с необходимой ультравысокой конечной латентностью.

- Медицинский IoT (IoMT): LiFi может быть использован для обеспечения необходимого покрытия сетей IoMT с высокой системой доступности и надёжности, так как надёжность и доступность являются основными проблемами для таких сетей. Кроме того, необходимая площадь покрытия делает технологию LiFi удобной для таких систем.

- Подводный IoT (IoUT): Подводная связь сталкивается с множеством проблем, связанных с распространением радиоволн через среду передачи. LiFi может обеспечить расстояние покрытия в шесть раз больше, чем радиоволны, что делает его более удобным для приложений IoUT.

- Автомобильный IoT (IoVT): LiFi может обеспечить эффективный канал для приложений V2V с высокой надёжностью. Внедрение LiFi в IoVT снижает затраты на связь и обеспечивает большую эффективность латентности. Кроме того, LiFi может быть использован для передачи данных между транспортными средствами и уличными единицами (RSU).

Существует множество преимуществ внедрения технологии LiFi в IoT-сети, которые можно кратко перечислить следующим образом:

1. Сигнализация: Для IoT-устройств, связанных с сетью, надёжная двусторонняя сигнализация критически важна для удобной маршрутизации данных. LiFi предлагает высоконадёжную скорость передачи данных до 10 Гбит/с.

2. Безопасность: При передаче или получении потока данных свет не может проходить через стены и двери. Это повышает безопасность и контроль над тем, кто может подключаться.

3. Использование спектра: Беспроводные устройства имеют огромный неиспользуемый потенциал ресурсов, поскольку световой поток в 1000 раз шире

полного радиочастотного спектра (300 ГГц). Это создает достаточную емкость для поддержки большого числа IoT-устройств.

4. **Повсеместное обнаружение:** LiFi может обнаруживать, когда IoT-система отключается от сети или повторно подключается в реальном времени. Это улучшает стабильность сети IoT.

5. **Энергопотребление:** Поскольку светодиоды являются низкоэнергетическими устройствами, LiFi значительно снижает энергопотребление. Поэтому он потребляет меньше энергии, чем WiFi, и более экологичен.

6. **Массовая машинная связь (ММС):** Массовые MIMO-системы, работающие в видимом световом диапазоне, обладают большой пропускной способностью.

7. **LiFi везде:** LiFi можно внедрить и использовать во всех помещениях, он дружелюбен к человеку, генерирует меньше помех между устройствами и имеет низкие затраты на развертывание.

Тем не менее, существуют и некоторые недостатки внедрения LiFi в IoT-сети, к которым относятся:

1. Из-за меньшего расстояния между передатчиком и приемником соотношение сигнал/шум (SNR) чрезвычайно высокое.

2. LiFi можно использовать только на устройствах с LiFi-сенсорами.

3. Необходим прямой видимый контакт (LOS) между передатчиком и приемником.

4. LiFi менее эффективен для наружных приложений из-за ограниченной площади покрытия.

### 2.5.2 Распределенные вычисления на краю для IoT-сетей

Вычисления на краю и IoT связаны между собой, поскольку устройства IoT обычно не обладают внутренней вычислительной мощностью и зависят от облачных ресурсов. В коммерческом плане существуют два основных типа вычислений на краю: fog computing и MEC computing. Fog computing — это новая парадигма распределенных вычислений, которая была недавно представлена и обладает ограниченной вычислительной мощностью, но большей гибкостью в развертывании. По сравнению с MEC-узлами, узлы fog имеют меньше ресурсов, но они более адаптивны.

Реализации MEC могут обеспечить задержку передачи в миллисекундах или меньше в большинстве случаев. Они также могут выполнять обработку данных в реальном времени, уменьшая частоту и объем передачи данных в центральную точку. Чувствительная информация также может быть ограничена локальными областями, что повышает безопасность компании.

Fog computing отлично подходит для приложений IoT, которые создают терабайты данных, требующих значительной обработки информации и транспортировки данных между облаком. Fog computing может быть весьма

ценным в различных приложениях IoT. В этом разделе рассматриваются концепции MEC и fog для IoT-сетей.

В работе [2] авторы рассмотрели потребление энергии в fog-основанных IoT-сетях. Работа внедрила парадигму зеленой энергии для улучшения энергетической эффективности fog-IoT сетей. Генетический алгоритм был представлен для обеспечения максимального числа задач с требуемым качеством обслуживания. Ключевыми показателями производительности, рассмотренными в процессе оценки, были задержка и потребление энергии.

В работе [3] авторы разработали общую структуру для интеграции IoT с системами сотовой связи пятого поколения (5G) с использованием распределенных вычислений на краю. Парадигмы fog и MEC использовались для систем IoT и 5G, а платформа предоставляла интерфейсы между серверами на краю. Более того, работа представила схему разгрузки, учитывающую потребление энергии и эффективность латентности для разработанной структуры. Основная сеть систем управлялась программно-определяемыми сетями (SDN) с множественными контроллерами. Система была оценена для гетерогенных сценариев, и разработанная модель была проверена на тестовой платформе IoT с большим количеством конечных устройств.

В работе [4] авторы разработали трехуровневую схему разгрузки для поддержки сетей на основе MEC. Рассматривались три уровня разгрузки: конечные устройства, cloudlet и удаленное облако. Задачи с чрезмерными затратами на связь обрабатываются локально на конечном устройстве, тогда как задачи с чрезмерными затратами на вычисления обрабатываются на краю удаленных облачных уровней. В схеме разгрузки, основанной на жадном подходе, планирование поддерживается вычислительными возможностями устройства, а для уменьшения затрат на связь задач используется стратегия жадной оптимизации.

Новизна данной работы заключается во внедрении LiFi в качестве интерфейса связи для IoT-сетей и тестировании этого в IoT-сетях. Более того, развертывание двух уровней распределенных вычислений на краю для IoT-сетей является новаторским. Интеграция модели fog-MEC и доказательство концепции для IoT-сетей на основе LiFi с плотным развертыванием рассматриваются впервые, насколько нам известно.

Предложенная структура IoT на основе LiFi

В этом разделе мы предоставляем общую структуру для IoT-сетей на основе LiFi. Рассматриваемые IoT-сети используют парадигму распределенных вычислений на краю с новой моделью fog-MEC. Рисунок 2.10 представляет собой структуру от конца до конца разработанной структуры.

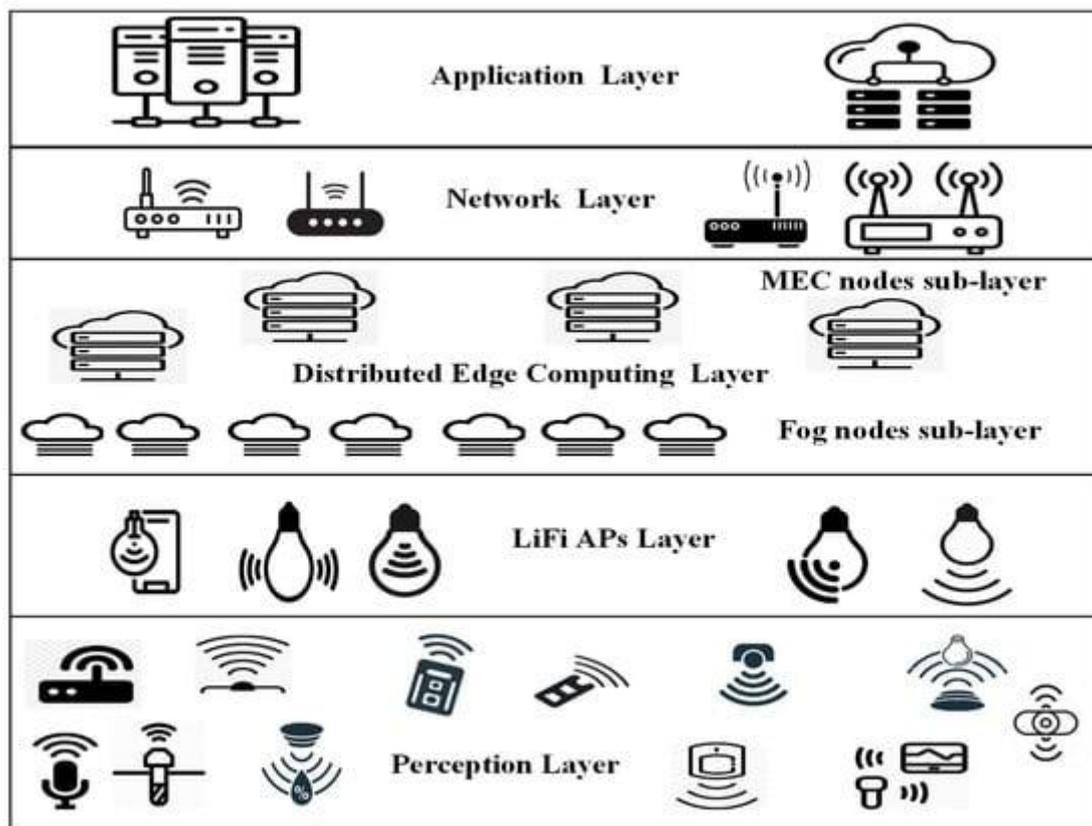


Рисунок 2.10 - Системная структура разработанной IoT-системы на основе LiFi

Разработанная IoT-система на основе LiFi состоит из четырех слоев, представленных на Рисунке 2.10. Система использует два основных слоя поверх традиционных слоев IoT-систем: слой связи LiFi и распределенный крайний слой.

### 2.5.3 Связь LiFi для сети IoT

Этот уровень отвечает за разработку методов связи между источником данных и хранилищем данных. LiFi можно установить в обычные светодиодные лампы для передачи сигналов через свет. Лампы LiFi служат конечной точкой связи и могут быть подключены к локальной сети (LAN) через стандартную интернет-архитектуру (например, Ethernet) или с помощью других беспроводных систем.

Слой связи LiFi развертывает распределенные точки доступа для обеспечения видимой световой связи с конечными устройствами IoT. Точки доступа LiFi должны быть ориентированы так, чтобы минимизировать перекрытие зон покрытия и достичь необходимого полного покрытия. Однако это вызывает внутрисетевые помехи, то есть помехи между точками доступа, которые необходимо управлять.

Еще одной проблемой, связанной с рассматриваемыми коммуникациями LiFi, является процесс переключения, который происходит, когда конечное устройство перемещается между зонами покрытия двух соседних точек доступа LiFi. Эта проблема критична для LiFi-связи, особенно с учетом мобильности конечных устройств. Перемещение между точками доступа LiFi увеличивает затраты на связь и задержку, что сказывается на общей производительности системы. Поэтому эту проблему следует решать так, чтобы она не влияла на требуемую производительность.

Для преодоления ранее упомянутых вызовов используется иерархическая структура точек доступа LiFi. Каждая группа точек доступа LiFi может образовывать сеть с множественным входом и выходом (MIMO) с фронтальным соединением к центральной точке, т.е. к контроллеру LiFi. Рисунок 2.11 представляет рассматриваемую иерархическую структуру сети на основе LiFi.

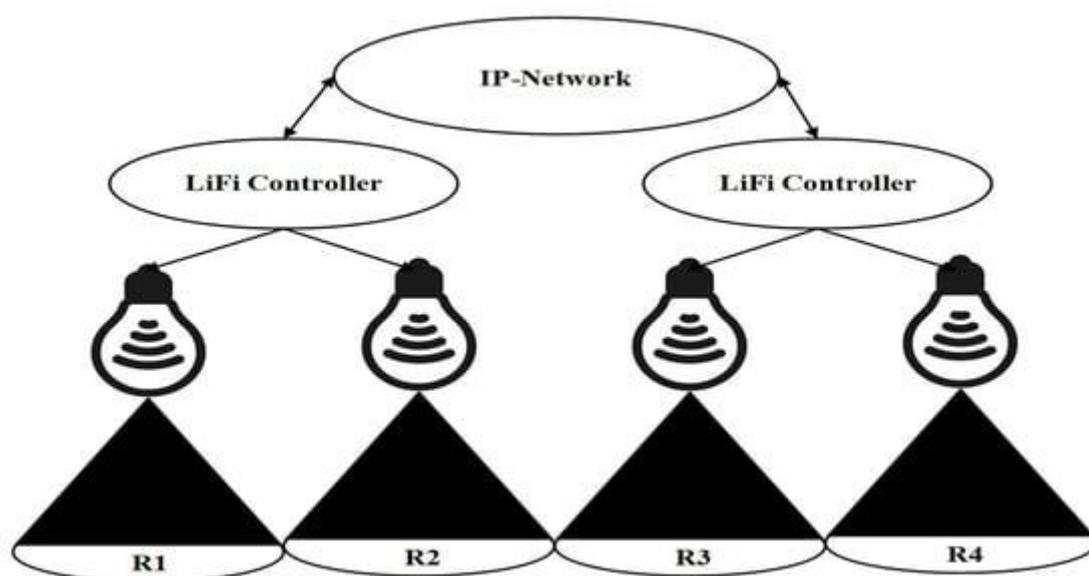


Рисунок 2.11 - Иерархическая структура рассматриваемой системы LiFi

Устройства, принадлежащие одной группе точек доступа, общаются с использованием неортогональных многопользовательских доступов (NOMA). Несколько конечных пользователей могут передавать данные одновременно с помощью NOMA. Более того, используется модель распространения света, представленная в [4]. Восходящая и нисходящая связи устанавливаются изменением интенсивности света светодиода через модуль управления. Контроллер LiFi имеет интерфейс к шлюзу IoT, подключенному к MEC-устройству. Разработанная модель предполагает наличие конечных устройств с гибридными узлами для поддержки как LiFi, так и радиоволновых коммуникаций.

#### 2.5.4 Модель Fog-MEC для сети IoT

Предлагаемая парадигма IoT имеет четырехуровневую структуру, как показано на Рисунке 1. В созданной сети IoT на основе распределенных вычислений на краю используются два уровня вычислительных единиц. Устройства fog computing устанавливаются между конечными устройствами и шлюзами на краю на этом начальном уровне. Обнаруженные данные предварительно обрабатываются и вычисляются с помощью распределенных fog-единиц, которые расположены близко к конечным устройствам. Точки доступа LiFi могут быть подключены к этим устройствам или могут быть установлены в качестве автономных узлов. Эти узлы служат средством передачи данных к и от близлежащих конечных устройств.

Сервера MEC являются вторым уровнем вычислительных устройств на краю, связанным с точками доступа и шлюзами IoT. Внедрение единиц MEC предоставляет второй путь для разгрузки данных, что снижает нагрузку на основную сеть, увеличивает общую масштабируемость и надежность сети, а также предоставляет второй уровень вычислительных ресурсов и энергетической поддержки для конечных устройств. Теперь в устройствах MEC могут быть реализованы алгоритмы искусственного интеллекта (AI), позволяющие достичь необходимого уровня автоматизации сети.

Устройства fog и MEC могут как размещать, так и поддерживать услуги в зрелой парадигме вычислений на краю, изображенной на Рисунке 2.12. Наш ранее разработанный алгоритм разгрузки, учитывается для созданной IoT-системы на основе двухуровневых вычислений на краю. Узлы fog или сервера MEC могут использоваться для выполнения задач, которые слишком сложны или требуют высокой энергетической стоимости. Рисунок 2.13 изображает уровни разгрузки созданной схемы fog-MEC, а Алгоритм 1 является рассматриваемым методом разгрузки для разработанной модели.

Алгоритм 1. Алгоритм разгрузки с учетом энергии и задержки для модели Fog-MEC	
1:	Initialize QoS parameters and Energy threshold of the device (IoT end device/fog/MEC)
2:	Calculate task specification parameters using the program profiler
3:	Calculate the local execution time
4:	If (local execution time meets QoS)
5:	Calculate the energy required for local handling of the task
6:	If (remaining energy after task execution > energy threshold level of the device)
7:	Handle the task locally
8:	end if

9: else
10: Request offloading of the higher level
11: Process offloading request
12: If (Time and energy decisions for accepting offloading are positive)
13: Accept offloading request
14: Offload the task to the dedicated server
15: Handle the task
16: Send result
17: else
18: Reject offloading request
19: Terminate the task
20: end if
21: end if

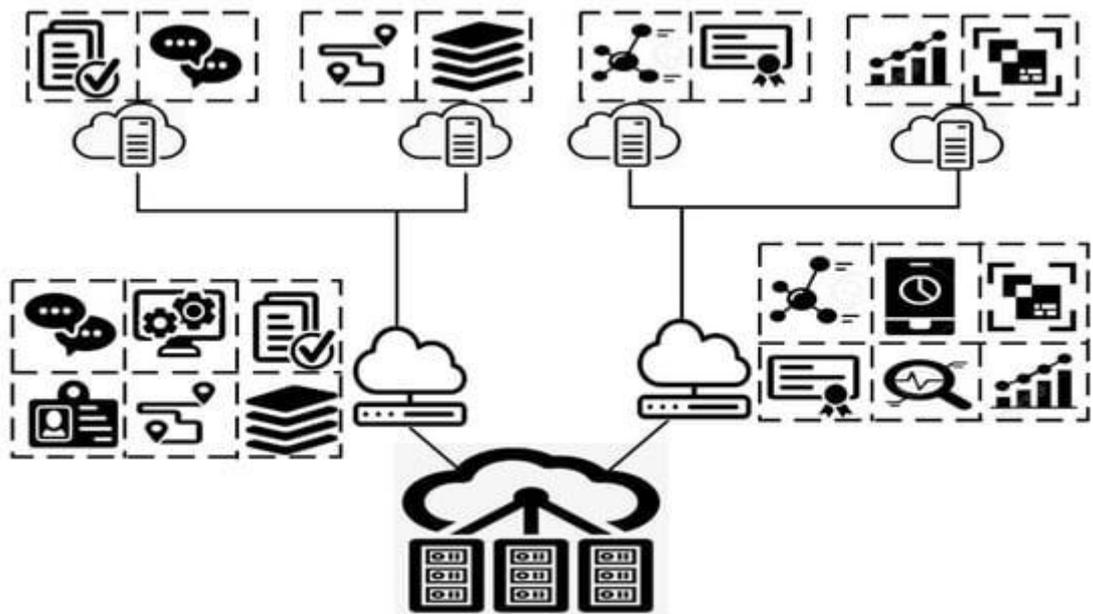


Рисунок 2.12 - Основные уровни разработанной схемы Fog-MEC

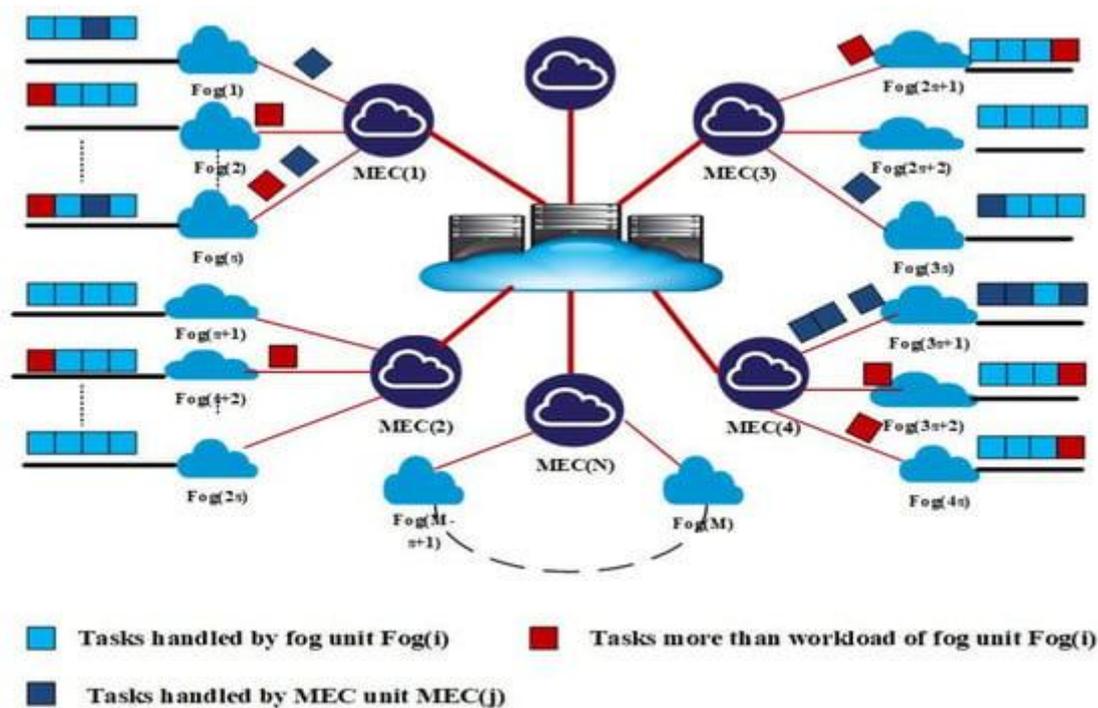


Рисунок 2.13 - Уровни разгрузки предложенной схемы Fog-MEC

В этом рисунке показано, как движется поток задач в системе Fog-MEC. Решающий механизм конечного устройства IoT принимает решение о том, обрабатывать задачу локально или отправить ее на узел fog или MEC, исходя из текущего состояния доступных ресурсов. Если локальная обработка не удалась, конечные устройства IoT передают свои вычислительные задачи на узлы fog в качестве первого варианта разгрузки. Узлы fog отвечают на запросы на разгрузку в зависимости от текущего состояния своих ресурсов и требуемого качества обслуживания (QoS) для каждой задачи. MEC-сервер, подключенный к обслуживающему шлюзу, берет на себя задачи, которые узлы fog не могут обработать. Для сетевых приложений алгоритмы машинного обучения могут выполняться на устройствах fog или MEC. Узлы fog используются для легковесных алгоритмов, тогда как MEC-устройства должны использоваться для более сложных задач.

Используя многосерверную модель очередей M/M/s, среднее время отклика вычислительного сервера можно рассчитать на основе коэффициента поступления задач. Среднее время отклика сервера fog рассчитывается с использованием формулы Эрланга-C следующим образом.

$$T_{Q-fog-t}(\lambda) = \frac{E_C \left( s_t, \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right)}{s_t \mu_t - \lambda_t} + \frac{1}{\mu_t},$$

$$E_C(n, \varphi) = \frac{\left( \frac{(s\varphi)^n}{n!} \right) \left( \frac{1}{1-\varphi} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n\varphi)^k}{k!} + \left( \frac{(n\varphi)^n}{n!} \right) \left( \frac{1}{1-\varphi} \right)},$$

Эти формулы помогают оценить производительность системы и определить, как эффективно обрабатываются запросы в сети Fog-MEC.

$$T_{Q-MEC-t}(\lambda) = \frac{E_C \left( s_t, \frac{\lambda_t}{\mu_t} \right)}{s_t \mu_t - \lambda_t} + \frac{1}{\mu_t},$$

### 2.5.6 Настройка Симуляции

Разработанная система IoT на основе LiFi была оценена с использованием платформы NS-3 и модифицированной среды CloudSim, представленной в [4]. NS-3 является надежной и проверенной средой симуляции для создания сетевых протоколов, которые могут быть реализованы в реальных сетях. Мы использовали библиотеки, представленные в [3], для разработанной системы.

В симуляции рассматривалась сеть из 12 точек доступа LiFi и 30 случайно распределенных конечных устройств. Четыре точки доступа LiFi выполняли функции контроллеров с интерфейсами к шлюзам IoT. Рассматриваемые параметры симуляции приведены в Таблице 1. Для восходящей и нисходящей передачи использовалась NOMA с моделью распространения, представленной в [3].

Таблица 1. Параметры Симуляции

Параметр	Значение
Количество точек доступа LiFi	12
Количество контроллеров LiFi	4
Количество конечных устройств	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Площадь сети	16 × 12 м <sup>2</sup>
Половина угла полувысоты светодиода	70°
Коэффициент отражения	0.8
Мощность передачи	8.8 Вт
Показатель преломления	1.5
Максимальное вертикальное расстояние	2.5 м
Минимальное вертикальное расстояние	1.5 м
Максимальное горизонтальное расстояние	3 м
Минимальное горизонтальное расстояние	0 м
Активная площадь фотодетектора	1 см <sup>2</sup>

Чувствительность фотодетектора	0.5 А/Вт
Полуградус приёма	70°
Увеличение оптического фильтра	1
Плотность мощности шума	$10^{-22}$ А <sup>2</sup> /Гц
Полоса пропускания	20 МГц
Скорость поступления ( $\lambda$ )	15
Максимальная нагрузка (fog) ( $W_{max-fog}$ )	30 (событий/с)
Максимальная нагрузка (МЕС) ( $W_{max-МЕС}$ )	100 (событий/с)
Узел fog	
- Хранилище/ОЗУ	512 Мб
- Обработка/ЦПУ	э [0.1, 0.3] ГГц
Сервер МЕС	
- Хранилище/ОЗУ	2048 Мб
- Хранилище/ЖД	5 Гб
- Обработка/ЦПУ	э [0.7, 2.5] ГГц

Рассматриваемая сеть для процесса моделирования — это сеть IoT со структурой, представленной на рисунке 2. В таблице 1 представлены параметры моделирования, использованные для настройки процесса моделирования. Каждая точка доступа LiFi была подключена к fog-узлу, в то время как контроллеры LiFi были подключены к серверам МЕС, по одному для каждого. Спецификации рассматриваемых fog-узлов и серверов МЕС представлены в таблице 1.

Был построен набор данных с рабочими нагрузками из 100 гетерогенных задач. Задачи соответствуют рабочей нагрузке реальных приложений. Предполагается, что разработанная система будет обрабатывать три категории приложений. Первая категория приложений соответствует приложениям с небольшой рабочей нагрузкой, таким как медицинские приложения, в то время как вторая категория предназначена для приложений с более высокой нагрузкой, таких как приложения на основе изображений. Третья категория включает мультимедийные приложения с очень высокой нагрузкой по сравнению с предыдущими тремя категориями. Задачи считаются поступающими по пуассоновскому процессу с частотой, указанной в таблице 1.

Система была смоделирована для трех сценариев, каждый из которых соответствует использованию определенного коммуникационного интерфейса для приложений IoT. В первом сценарии используется только интерфейс LiFi с иерархической структурой, представленной на рисунке 2. Вторым сценарий использует гибридный коммуникационный интерфейс между соединениями LiFi и WiFi, в то время как третий сценарий использует только WiFi в качестве интерфейса короткого радиуса действия для конечных устройств.

### 2.5.7 Результаты моделирования

Рисунок 2.14 показывает среднюю задержку выгрузки задач между устройствами IoT и узлами на краю с учетом расстояния до точек доступа для трех рассматриваемых сценариев. Использование LiFi в качестве коммуникационного интерфейса обеспечивает минимальную задержку выгрузки; однако задержка выгрузки увеличивается с увеличением расстояния до узла, т.е. до точки доступа. Наши результаты показывают, что внедрение гибридных интерфейсов LiFi и WiFi достигает большей эффективности по задержке, чем WiFi и LiFi для различных позиций относительно точек доступа. Гибридная схема обеспечивает улучшение производительности по задержке в среднем на 62% по сравнению со схемой WiFi.

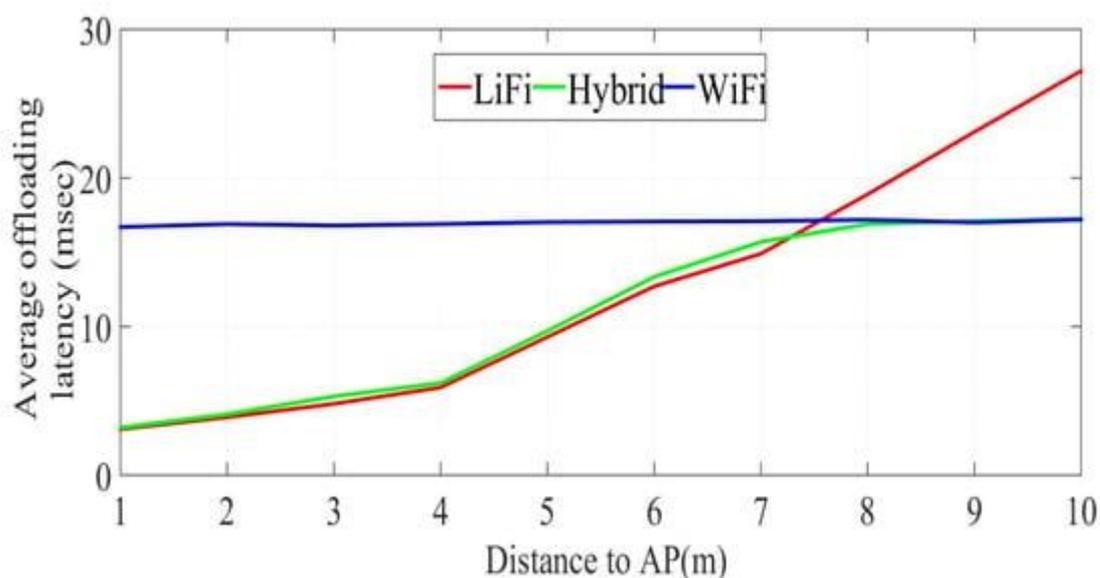


Рисунок 2.14 Средняя задержка выгрузки для трех систем с учетом расстояния до точки доступа (AP)

Рисунок 2.15 демонстрирует коммуникационные затраты разработанной системы для различных количеств развернутых устройств. Наши результаты показывают, что коммуникационные затраты увеличиваются с ростом числа развернутых устройств; однако этот нежелательный эффект варьируется в зависимости от используемого коммуникационного интерфейса. Интерфейсы LiFi и гибридные интерфейсы достигают большей эффективности, т.е. меньших затрат, по сравнению с традиционным подключением WiFi, особенно с увеличением числа развернутых устройств. Средний процент снижения коммуникационных затрат при использовании подключения LiFi составляет 48%.

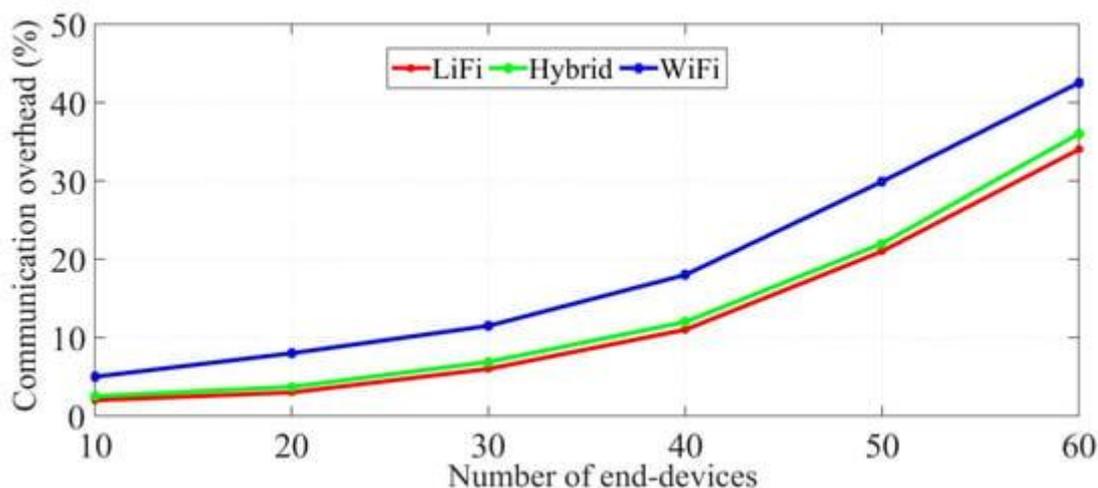


Рисунок 2.15 - Коммуникационные затраты трех рассматриваемых систем для различных количеств конечных устройств.

Во время процедуры моделирования было использовано четыре различных системы для изучения влияния двух уровней распределенных вычислений на краю. Первой смоделированной системой была система fog-MEC. Второй подход использовал только вычислительные единицы на уровне MEC, без развертывания fog-единиц. В третьей системе были развернуты распределенные fog-единицы без MEC, тогда как в четвертой использовалась обычная IoT-сеть.

Задержка системы представлена на рисунке 2.16 для пяти различных смоделированных ситуаций.

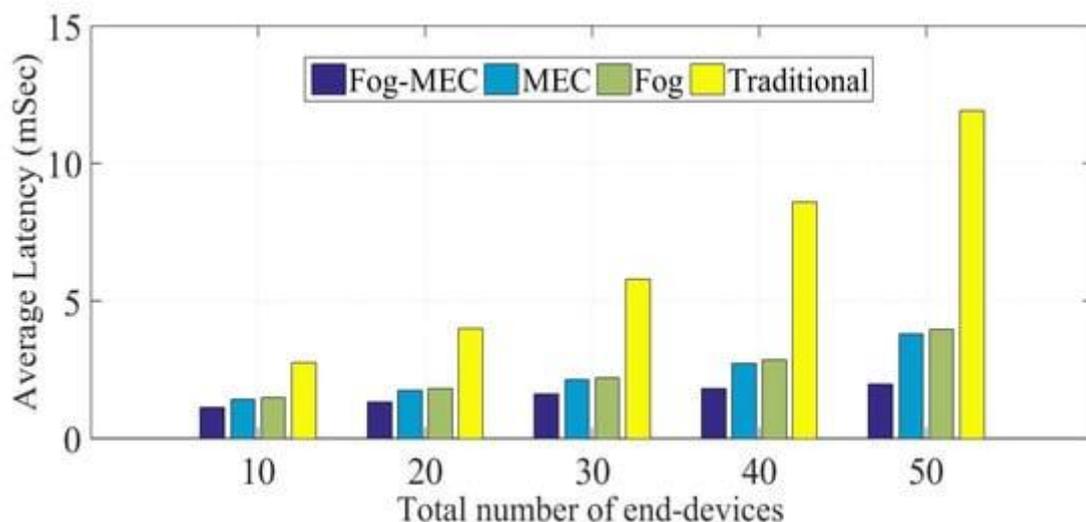


Рисунок 2.16 - Среднее время обработки IoT-задач для предложенной модели fog-MEC в сравнении с другими существующими системами

Смоделированные IoT-сети включают в себя увеличивающееся количество развернутых устройств по мере перехода через сценарии. Это демонстрирует преимущества распределенных вычислений на краю. Введение двух уровней

вычислительных единиц на краю снижает среднее время, необходимое для выполнения вычислительных операций. В сравнении со стандартными IoT-сетями без вычислительных единиц на краю, парадигма fog-MEC обеспечивает прирост производительности на 67% в эффективности задержки. Эффективность задержки IoT-сетей с только одним уровнем, т.е. fog-узлами, улучшается на 46% при добавлении двух уровней вычислений на краю. Таким образом, введение еще одного уровня вычислений на краю снижает задержку в коммуникации, обрабатывая и управляя IoT-задачами вблизи устройств с небольшими расстояниями передачи.

Для каждого сценария моделирования на рисунке 2.17 показано среднее количество заблокированных задач. При ограниченном количестве конечных устройств разработанная модель fog-MEC снижает количество заблокированных задач до нуля. С увеличением числа конечных устройств процент заблокированных задач возрастает для всех рассматриваемых систем; однако внедрение вычислительных единиц на краю уменьшает эту проблему. Разработанная модель fog-MEC снижает процент заблокированных задач в среднем на 32% при развертывании одного уровня вычислений на краю и на 67% в сравнении со стандартными IoT-сетями без уровней вычислений на краю. Модель fog-MEC, с другой стороны, максимизирует использование вычислительных единиц на краю, увеличивая использование серверов. Рисунок 2.8 показывает, что созданная модель превосходит другие системы с одним уровнем в среднем на 14% по эффективности использования ресурсов.

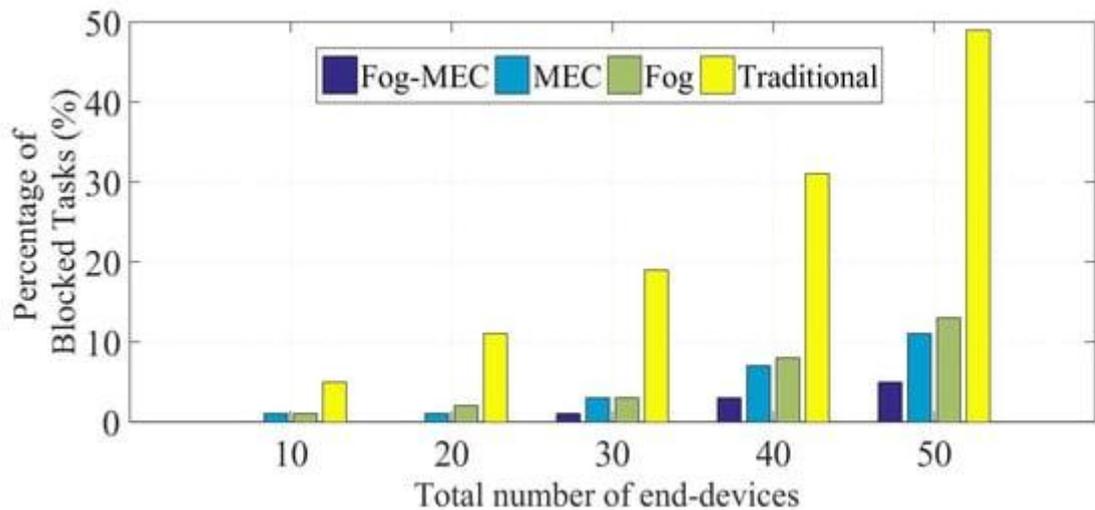


Рисунок 2.17 - Процент заблокированных задач для предложенной модели fog-MEC в сравнении с другими существующими системами.

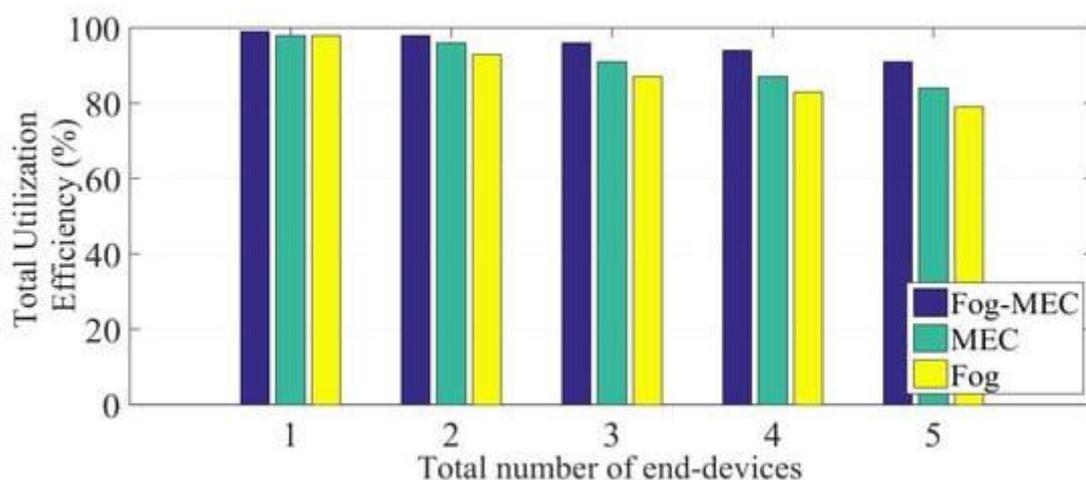


Рисунок 2.18 - Общая эффективность использования предложенной модели fog-MEC в сравнении с другими существующими системами.

Введение LiFi в сети IoT предлагает новый способ достижения необходимого покрытия, надежности, доступности и масштабируемости. LiFi можно использовать в качестве коммуникационного интерфейса для большинства внутренних IoT-приложений благодаря легкости развертывания. Сочетание LiFi и WiFi в качестве интерфейсов связи для IoT-приложений обеспечивает снижение коммуникационных затрат на 48% по сравнению с традиционными системами. Более того, это снижает задержку при передаче данных в среднем на 62%.

Распределенные вычисления на крае сети — это еще одна парадигма, которая укрепляет будущее сетей IoT. Предложенная модель fog-MEC предоставляет множество преимуществ для рассматриваемой сети IoT на базе LiFi, включая сокращение задержки, повышение эффективности использования ресурсов и увеличение доступности системы. Модель fog-MEC снижает задержку обработки вычислительных задач в среднем на 67% по сравнению с традиционными системами IoT, то есть системами без вычислительных узлов на крае. Кроме того, она увеличивает эффективность использования ресурсов в среднем на 14%.

### 3 Расчет пропускной способности сетей Li-Fi

Согласно теореме Шеннона – Хартли, пропускная способность  $C$  (верхняя граница скорости передачи), равна данной средней мощности сигнала  $S$ , который можно передать через аналоговый канал связи подверженный аддитивному белому гауссовскому шуму  $N$  [1].

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N), \quad (3.1)$$

где  $C$  – пропускная способность канала, бит/с;

$B$  – полоса пропускания, Гц;

$S$  – полная мощность сигнала над полосой пропускания, Вт;

$N$  – полная шумовая мощность над полосой пропускания, Вт.

В VLC технологии используются RGB светодиоды, поэтому у нас имеется 3 полосы пропускания:  $B_R + B_G + B_B$ . Спектр видимого света делится на:

Фиолетовый–790-680 ТГц; синий–680-620 ТГц; голубой–620-600 ТГц; зеленый–600-530 ТГц; желтый–530-510 ТГц; оранжевый–510-480 ТГц; красный–480-400 ТГц. Отсюда следует что (теоретически) общая полоса пропускания составляет:  $60 + 70 + 80 = 210$  (ТГц).

Однако на практике современные светодиоды имеют доминантную длину волны не выше 8нм. Так, например, излучение используемого светодиода LXML-PWC1-0120 у синего света имеет длину волны от 460 до 465 нм, зелёного–от 530 до 535 нм, красного–от 620 до 630 нм. Следовательно, можно определить ширину полосы пропускания светодиода для каждого света

$$B_B = \frac{\nu}{\lambda_{B \min}} - \frac{\nu}{\lambda_{B \max}} = \left( \frac{299792458}{460 - 10^{-9}} - \frac{299792458}{465 - 10^{-9}} \right) * 10^{12} = 7 \text{ (ТГц)},$$

$$B_G = \frac{\nu}{\lambda_{G \min}} - \frac{\nu}{\lambda_{G \max}} = \left( \frac{299792458}{530 - 10^{-9}} - \frac{299792458}{535 - 10^{-9}} \right) * 10^{12} = 5.3 \text{ (ТГц)},$$

$$B_R = \frac{\nu}{\lambda_{R \min}} - \frac{\nu}{\lambda_{R \max}} = \left( \frac{299792458}{620 - 10^{-9}} - \frac{299792458}{630 - 10^{-9}} \right) * 10^{12} = 7.7 \text{ (ТГц)}.$$

где  $\nu$  – скорость электромагнитной волны в вакууме, м/с;

$\lambda_{B \min}$  – минимальное значение длины волны светодиода с излучением синего цвета, нм;

$\lambda_{B \max}$  – максимальное значение длины волны светодиода с излучением синего цвета, нм;

$\lambda_{G \min}$  – минимальное значение длины волны светодиода с излучением зелёного цвета, нм;

$\lambda_{G \max}$  – максимальное значение длины волны светодиода с

излучением зелёного цвета,

$\lambda_{R \min}$ —минимальное значение длины волны светодиода с излучением красного цвета, нм;

$\lambda_{R \max}$ —максимальное значение длины волны светодиода с излучением красного цвета, нм;

Следовательно

$$B_R + B_G + B_B = 7,7 + 5,3 + 7 = 20 \text{ (ТГц)}.$$

Мощность сигнала  $S$ , то есть в данном случае световая мощность в соответствующем потоке излучения оценивается световым потоком  $\Phi$ . Светодиодный модуль белого света SP-02-W4 компании SinkPAD, имеет начальный световой поток в 800 лм.

$$S_0 = \Phi_0 = 800 \text{ (лм)},$$

где  $S_0$  – начальная мощность сигнала, лм;

$\Phi_0$ – начальное значение светового потока, лм.

Искусственное и природное освещение, загазованность воздуха являются основными видами помех и шумов в VLC. Они влияют на уровень освещенности, поэтому его можно использовать для нахождения уровня шума. Начальное значение светового потока  $\Phi_0$  может быть выражено в люксах как единица освещённости, так как 1 люкс равен освещённости поверхности площадью 1 м<sup>2</sup> при световом потоке падающего на неё излучения, равно м 1 лм:

$$E_0 = \frac{\Phi_0}{1} = 800 \text{ (лк)}.$$

Зная исходное значение светового потока, можно определить силу света :

$$I = \frac{\Phi_0}{\omega}, \quad (3.2)$$

где  $\omega$ –телесный угол.

Также известно, что телесный угол при вершине прямого кругового конуса с углом раствора  $2 \cdot \alpha$  равен

$$\omega = 2\pi \cdot (1 - \cos(\alpha)), \quad (3.3)$$

$$I = \frac{\Phi_0}{2\pi(1 - \cos(\alpha))}. \quad (3.4)$$

Таким образом, можно определить зависимость мощности света передатчика данных Li-Fi в той или иной точке, от расстояния и угла до принимающего оборудования по формуле

$$S_n = \frac{I}{r_n^2} \cos(i_n), \quad (3.5)$$

где  $r_n$  – расстояние между передатчиком и приемником Li-Fi, м;

$i_n$  – угол падения лучей света относительно нормали передатчика к приемнику Li-Fi, рад.

Зная, что мощность шума  $N$  в данном случае может оцениваться как уровень общей освещенности  $E_{\text{общ}}$ , которая содержит в себе искусственную освещенность  $E_{\text{иск}}$ , а так же естественную освещенность  $E_{\text{ест}}$  и отраженную (глянцевые поверхности, белые стены, зеркала и др.) освещенность  $E_{\text{отр}}$  [1]

$$\begin{aligned} N = E_{\text{общ}} &= E_{\text{ест}} + E_{\text{иск}} + E_{\text{отр}} = \\ &= \frac{I_{\text{ест}}}{r_{\text{ест}}^2} \cos(i_{\text{ест}}) + \frac{I_{\text{иск}}}{r_{\text{иск}}^2} \cos(i_{\text{иск}}) + \frac{I_{\text{отр}}}{r_{\text{отр}}^2} \cos(i_{\text{отр}}), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $I_{\text{ест}}$  - сила света естественных источников света, кд;

$r^2$  - расстояние до естественных источников света, м;

$i_{\text{ест}}$  - угол падения лучей естественных источников света относительно нормали к поверхности, рад;

$I_{\text{иск}}$  - сила света искусственных источников света, кд;

$r^2$  - расстояние до искусственных источников света, м;

$i_{\text{иск}}$  - угол падения лучей искусственных источников света относительно нормали к поверхности, рад;

$I_{\text{отр}}$  - сила отраженного света, кд;

$r^2$  - расстояние до источника отраженного света, м;

$i_{\text{отр}}$  - угол падения лучей отраженного света относительно нормали к поверхности, рад.

Для расчётов в качестве  $E_{\text{иск}}$  могут быть использованы требуемые значения освещённости различных помещений, которые указаны в таблице 3.1, а значение  $E_{\text{ест}}$  при нормальных условиях в офисных помещениях можно брать в 100лк.

Таблица 3.1–Нормируемые показатели освещения основных помещений общественного здания, а также сопутствующих им производственных помещений

Тип помещения	Необходимая освещенность, лк
Учебные кабинеты технического черчения и рисования	500
Помещения для работы с дисплеями и видео терминалами, залы ЭВМ	400
Аудитории, учебные кабинеты, лаборатории в техникумах и высших учебных заведениях	400
Мастерские по обработке металлов и древесины	300
Макетные, столярные, ремонтные мастерские	300

Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	300
Конференц-залы, залы заседаний	200
Вестибюли и гардеробные уличной одежды: в вузах, школах, общежитиях, гостиницах, при входах в крупные общественные здания	150
Лестницы: главные лестничные клетки, тамбуры	100
Книгохранилища, архивы, фонды открытого доступа	100

Согласно изложенным правилам нормам, расчётное значение среднее взвешенного коэффициента отражения внутренних поверхностей помещений  $k_{отр}$  в нормальных условиях следует принимать равным 0,5.

$$E_{отр} = E_{иск} \cdot k_{отр} = E_{иск} \cdot 0,5.$$

Следовательно

$$C_n = (B_R + B_G + B_B) \log_2 \left( 1 + \frac{I \cdot \cos(i_n)}{(E_{ест} + E_{иск} + E_{отр}) \cdot r_n^2} \right). \quad (3.7)$$

В данном офисном помещении используется светодиодный модуль белого света SP-02-W4 со световым потоком в 1600лм и диаграммой направленности прямого кругового конуса которая дает следующую силу света по формуле (3.4)

$$I = \frac{800}{2\pi(1 - \cos(\alpha))}.$$

Если приемное устройство располагается непрямо под излучателем, а например в  $45^\circ$  от него, то

$$I = \frac{800}{2\pi(1 - \cos(45))} = 270(\text{кд}).$$

Однако угол падения лучей относительно нормали от передатчика к приемнику измеряется в радианах, то необходимо перевести значения угла в градусах в радианы по формуле

$$i_n = i_{ng} \frac{\pi}{180},$$

где  $i_{ng}$ -угол падения лучей света относительно нормали от передатчика к приемнику Li-Fi.

В таком случае мы получаем следующую пропускную способность

$$C = (7,7 + 5,3 + 7)10^{12} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{270 \cos\left(\frac{45\pi}{180}\right)}{(100 + 400 + 200) \cdot 11,5} \right) 10^{-9} = 197(\text{Гб/с}).$$

Следует отметить, что в реальном помещении угол падения света излучающей свето диодной лампы относительно нормали к поверхности будет зависеть от соотношения расстояния  $r$ , от фото приемника до передатчика по линии прямой видимости и расстояния  $h$ , равного отрезку от уровня высоты расположения фотоприёмника до уровня высоты подвеса светодиодной лампы, которая передает данные следующим образом

$$i = \arccos\left(\frac{h}{r}\right), \quad (3.9)$$

где  $h$  – это отрезок, равный расстоянию от уровня высоты расположения фотоприёмника до уровня высоты подвеса лампы, которая передает данные, м.

Зная что  $h$  равен 2,4 метра, так как высота подвеса светодиода = 3,4 м, а высота стола на котором находится приемник=1м, при этом в системах VLC PureLifi с использованием OFDM ширина полосы пропускания поднесущей в среднем равна 0,7 ТГц, следовательно используя формулы (3.9, 3.7) можно найти пропускную способность для искомого помещения с используемым оборудованием.

$$C = 0.7 \cdot 10^{12} \cdot \log_2\left(1 + \frac{269 \cos(\arccos(\frac{2,4}{3,4}))}{(100 + 400 + 200) \cdot 11,5}\right) 10^{-9} = 23,1(\text{Гбит/с}).$$

Однако на практике в системах VLC для передачи сигнала абоненту, используется не весь спектр в 20ТГц, а лишь малая его часть, для его таким образом для передачи данных другим абонентам. Так же скорость передачи зависит от светодиодов, а точнее от максимально возможной скорости их мерцания (то есть та, за пределами которой светодиоды выходят из строя) и скорость восприятия данных приемного устройства (фотодиода). В настоящее время на практике, при использовании оборудования компании pureLiFi для дуплексной связи, ограничение пропускной способности канала сетей Li-Fi создаёт использование технологии Giga-IR (гигабитное инфракрасное излучение) для обратной связи, которая обладает пропускной способностью в 1 Гбит/с.

Помехо защищенность оптического канала связи можно определить по следующей формуле

$$A = 10 \log_{10} \frac{S_{min}}{N} = 10 \log_{10} \left( \frac{I \cdot \cos(\arccos(\frac{h}{r_n}))}{(E_{ест} + E_{иск} + E_{отр}) \cdot r_n^2} \right), \quad (3.10)$$

где  $A$  – уровень помехо защищенности оптического канала связи, дБ;

$S_{min}$  – минимальная мощность света, лм. Высокое значение  $A$  означает низкое влияние шума на сигнал.

Для дальнейших примеров расчетов для наглядности пропускная

способность канала будет выражаться в Мбит/с в логарифмическом масштабе, угол падения лучей света от передатчика к источнику в градусах, с шириной полосы пропускания в 1 ТГц, в помещении освещенностью в 400лк от искусственных источников света и 100лк от естественного освещения и коэффициентом отражения внутренних поверхностей помещения равным 0,5, а так же будут использоваться другие виды светодиодов с различными показателями силы света, при  $B = 1\text{ТГц}$ ,  $E_{\text{общ}} = 700\text{лк}$ , представлены на рисунке 3.1.

Зависимость пропускной способности сети Li-Fi от расстояния при различных показателях силы света (30кд, 100кд, 270кд, 500кд, 700кд и 1000кд), ширины полосы пропускания равно й 1 ТГц и общей освещенности равной 700 люкс, приведены в таблицах 3.2 и 3.3 [1].

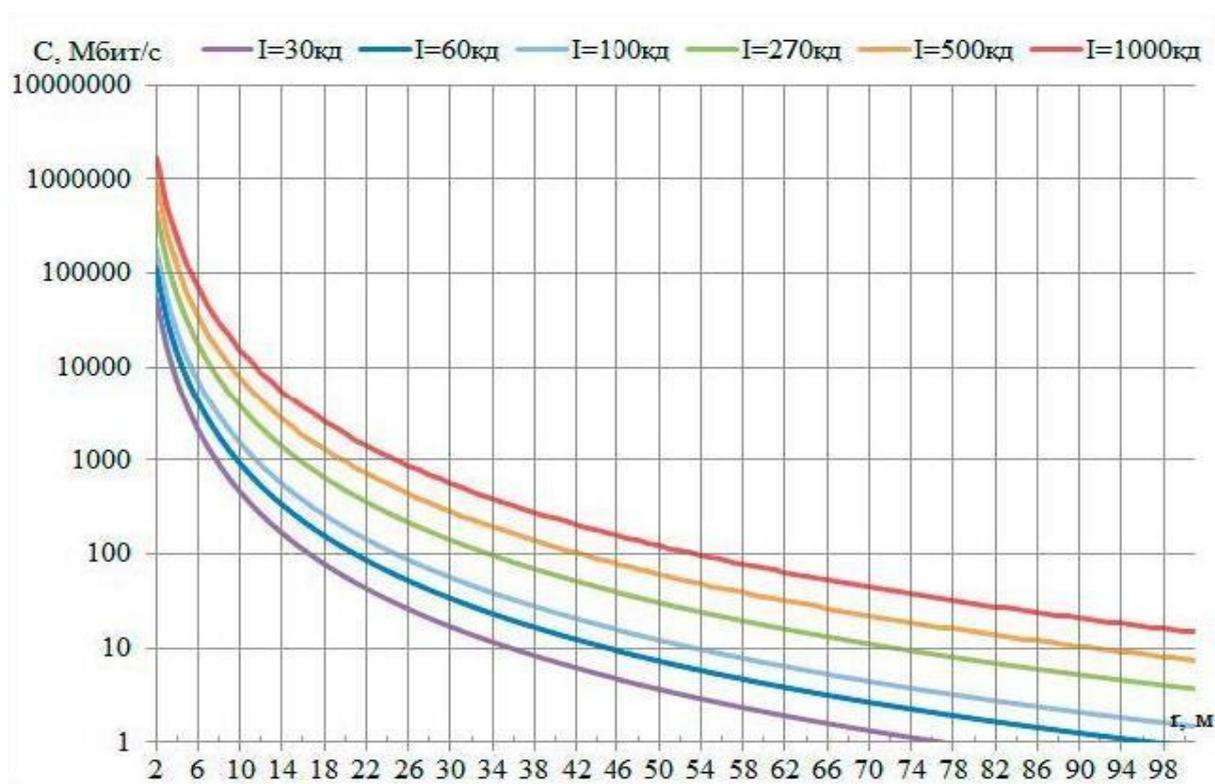


Рисунок 3.1 - Зависимость пропускной способности сети VLC

Таблица 3.2 - Зависимость пропускной способности сети Li-Fi от расстояния  $r$  при различных показателях  $I$ ,  $V = 1$  ТГц,  $E_{общ} = 700$  лк

I = 500кд			I = 700кд			I = 1000кд		
$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с	$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с	$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с
2	25	89890,26	2	25	89890,26	2	25	89890,26
3	30	27755,65	3	30	27755,65	3	30	27755,65
4	35	11835,73	4	35	11835,73	4	35	11835,73
5	40	6081,93	5	40	6081,93	5	40	6081,93
8	45	3525,13	8	45	3525,13	8	45	3525,13
11	50	2221,94	11	50	2221,94	11	50	2221,94
14	55	1489,43	14	55	1489,43	14	55	1489,43
17	60	1046,77	17	60	1046,77	17	60	1046,77
20	65	762,04	20	65	762,04	20	65	762,04
25	70	573,77	25	70	573,77	25	70	573,77
30	75	441,31	30	75	441,31	30	75	441,31
35	80	347,97	35	80	347,97	35	80	347,97
40	85	278,78	40	85	278,78	40	85	278,78

Таблица 3.3 - Зависимость пропускной способности сети Li-Fi от расстояния  $r$  при различных показателях  $I$ ,  $V=1$  ТГц,  $E_{общ} = 700$ лк

I = 30кд			I = 100кд			I = 270кд		
$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с	$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с	$r, м$	$i^0$	C, Мбит/с
2	25	5702,15	2	25	5702,15	2	25	5702,15
3	30	1694,29	3	30	1694,29	3	30	1694,29
4	35	711,85	4	35	711,85	4	35	711,85
5	40	388,64	5	40	388,64	5	40	388,64
8	45	210,12	8	45	210,12	8	45	210,12
11	50	103,92	11	50	103,92	11	50	103,92
14	55	70,34	14	55	70,34	14	55	70,34
17	60	54,19	17	60	54,19	17	60	54,19
20	65	30,74	20	65	30,74	20	65	30,74
25	70	16,18	25	70	16,18	25	70	16,18
30	75	7,3	30	75	7,3	30	75	7,3
35	80	3,75	35	80	3,75	35	80	3,75
40	85	1,65	40	85	1,65	40	85	1,65

График областей пропускной способности сетей Li-Fi при разных параметра силы света показан на рисунке 3.2. Зависимость помехо защищенности оптического канала связи сети Li-Fi от расстояния и различных показателях силы света показан на рисунке 3.3 [1].

Зависимость помехо защищенности от расстояния между передатчиком и приемником в сети Li-Fi по помещению с высотой потолка 3,4 м, на котором располагается передатчик, и высотой рабочего стола 1м, на котором располагается

приемник, будет определена для двух случаев:

а) при большом значении силы света светодиодного излучателя в 600кд с ламбертовской диаграммой направленности светового излучения и при высоком значении окружающей освещенности (100 лк от естественных источников света и 400 лк от искусственных источников, коэффициент отражения 79 внутренних поверхностей помещения 0,5);

б) при малом значении силы света светодиодного излучателя в 30 кд с ламбертовской диаграммой направленности светового излучения и при высоком значении окружающей освещенности (100 лк от естественных источников света и 400 лк от искусственных источников, коэффициент отражения внутренних поверхностей помещения 0,5).

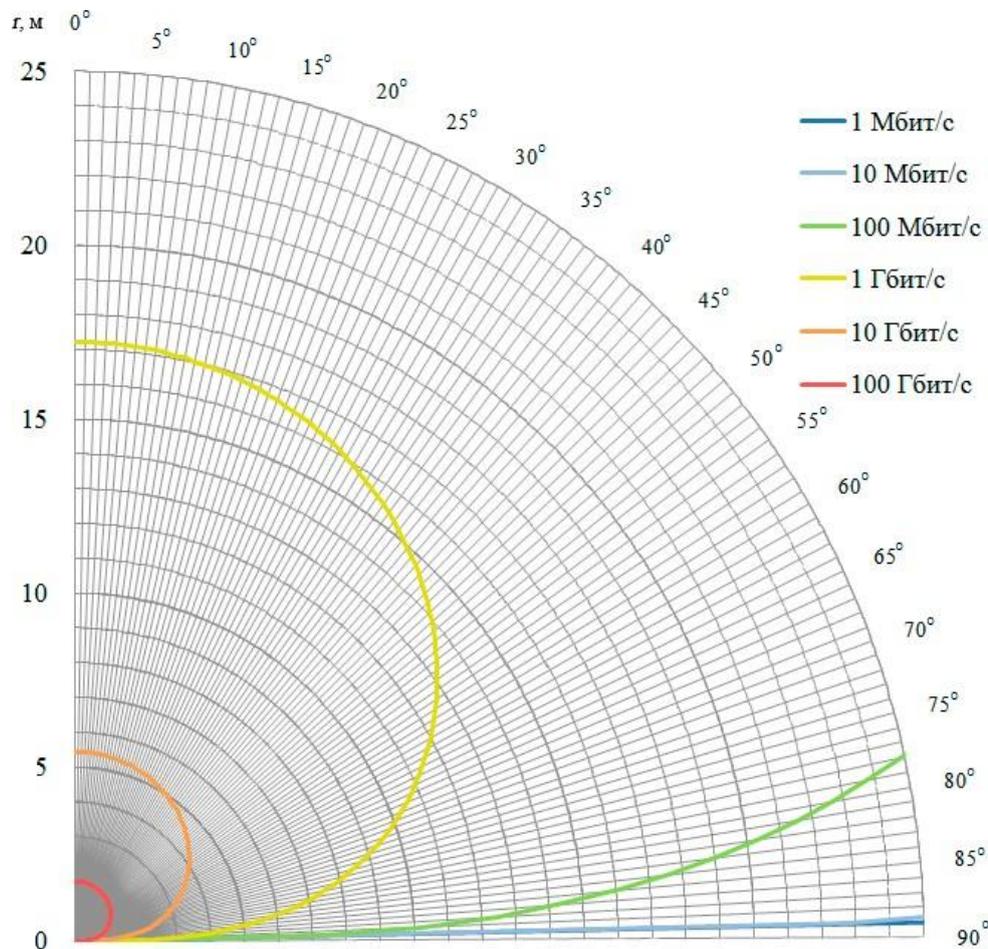


Рисунок 3.2 - Области различной пропускной способности сети Li-Fi при  $I = 270$  кд,  $V = 1$  ТГц,  $E_{\text{о бщ}} = 700$  лк

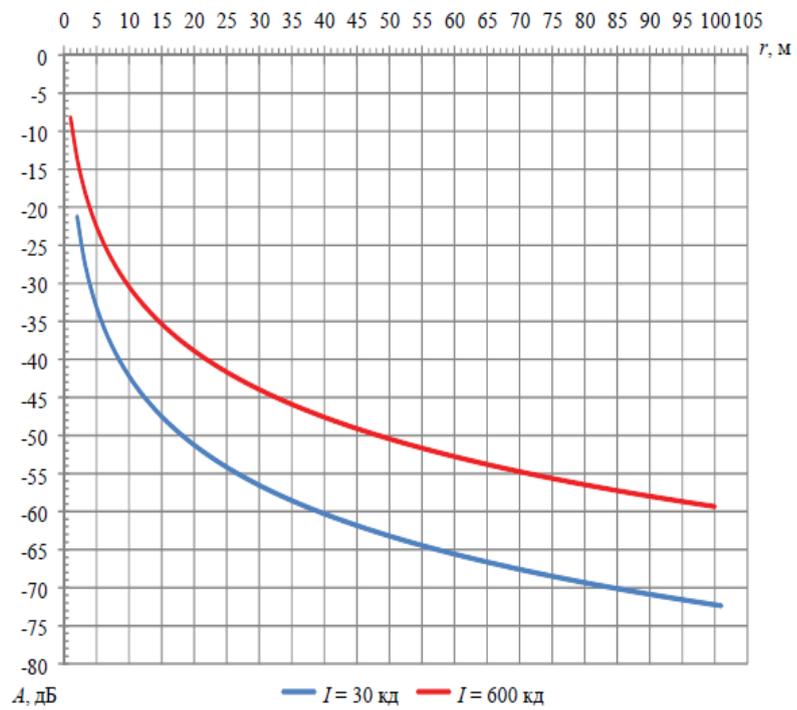


Рисунок 3.3 - Зависимость помехо защищенности оптического каналасети Li-Fi отрасстояния  $r$ , при  $E_{\text{общ}} = 700$  лк

#### 4 Расчет волоконно-оптической линии связи

В данной работе два филиала одного банка, находящихся в разных городах РК (Нур-Султан - Алматы), объединены волоконно-оптической линией связи (ВОЛС). Протяженность автомобильной дороги между конечными пунктами (ОП) равняется 1268 км. Для расчета проложенной волоконно-оптической трассы необходимо учитывать: протяженность трассы, наличие и сложность пересечения рек, железных и шоссейных дорог, трубопроводов, характер местности, почв, грунтовых вод, возможность применения механизированной прокладки, необходимость защиты сооружений связи от электромагнитных влияний и коррозии, возможность и условия до ставки грузов (материалов, оборудования) на трассу, жилищно-бытовые условия и возможность размещения обслуживающего персонала. Исходя из этих требований, предпочтение отдается прокладке кабеля вдоль автомобильных дорог. Также важным элементом является размещение обслуживаемых и необслуживаемых регенерационных пунктов (ОРП), находящихся на трассе ВОЛС.

ВОЛС проходящий вдоль автомобильной дороги г. Нур-Султан – г. Темиртау – г. Караганда – с. Аксу – г. Балхаш – с. Улькен — с. Каншенгель – с. Шамалган – г. Алматы, показан на рисунке 4.1. Характеристика автомобильной дороги Нур-Султан – Алматы приведена в таблице 4.1.

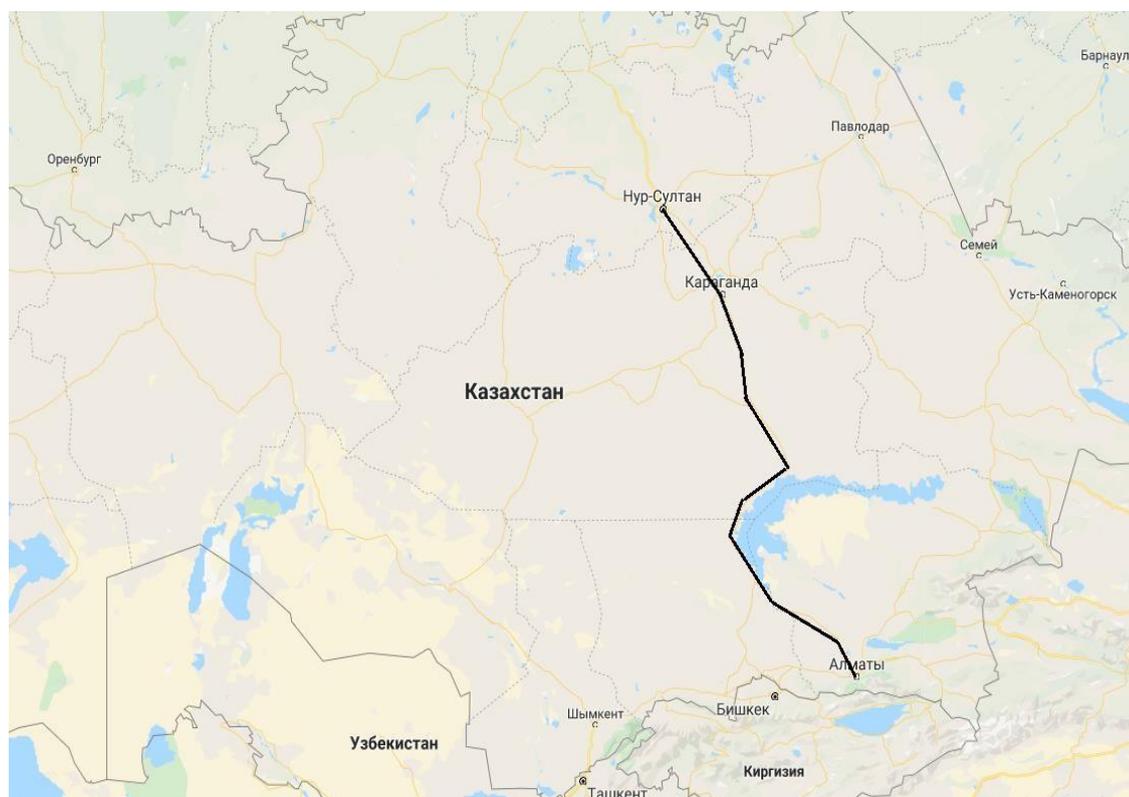


Рисунок 4.1 - ВОЛС вдоль автомобильной дороги Нур-Султан – Алматы

Таблица 4.1 - Характеристика автомобильной дороги Нур-Султан–Алматы

Показатели	Значения								
	Всего	О П1- ОР П2	О РП2 - О РП3	О РП3 - О РП4	О РП4 - О РП5	О РП5 - О РП6	О РП6 - О РП7	ОРП7 - О РП8	О РП8- О П9
Протяженно сть трассы	128 8	184	58	134	256	265	137	208	36
Переходы через до роги	74	15	7	6	9	6	7	10	18
Автомобиль ные	63	14	4	6	7	4	6	7	13
Железные дороги	11	1	3	0	2	2	1	3	5
Переходы через реки,	14	4	2	1	4	1	2	0	0
Судохо дные	2	1	0	0	1	0	0	0	0
Несудо ходные	12	3	2	1	3	1	2	0	0

На данной трассе используется оптический кабель марки О КБ-М8П- 10-0,22-8. В таблице 4.2 приведена характеристика оптического кабеля, а на рисунке 4.2 его конструкция.

Таблица 4.2 – Характеристика оптического кабеля

Характеристика	Значение
Тип сердечника	Повивной
Тип оптических волокон	Одномодовое
Число оптических волокон	8
Материал силового элемента	Стекло пластиковый пруток
Материал влаго защитной оболочки	Полиэтиленовая оболочка
Тип защитного покрытия	Стальная ламинированная гофрированная лента
Строительная длина, км	5
Допустимое тяговое усилие, кН	10 - 20

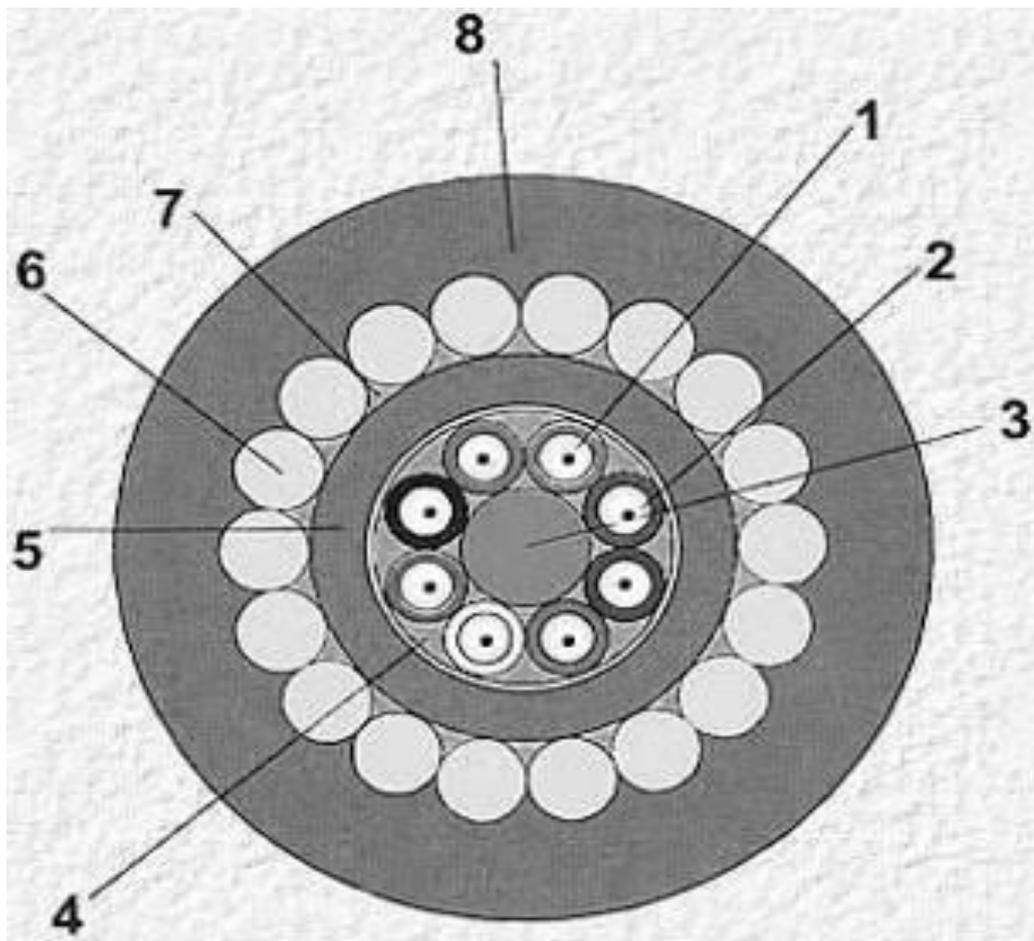


Рисунок 4.2 – Конструкция кабеля ОКБ-М8П-10-0,22-8

На рисунке 4.2 показаны следующие элементы:

- а) оптическое волокно;
- б) внутримодульный гидрофобный наполнитель;
- в) центральный силовой элемент: стекло пластиковый прут к; г) межмодульный гидрофобный наполнитель;
- д) промежуточная оболочка из полиэтилена;
- е) броня из стальной оцинкованной проволоки; ж) гидрофобный наполнитель;
- и) защитная оболочка из полиэтилена.

В маркировке кабеля ОКБ-М8П-10-0,22-8 приняты следующие обозначения:

ОК – оптический кабель с полиэтиленовой оболочкой;

Б – броня из стальной проволоки;

М – броня из стальной ламинированной гофрированной ленты; 8 –

количество оптических модулей;

П – тип центрального силового элемента (стекло пластикый прут к);

10 – тип оптического волокна (ООВ, МОВ);

0,22 – предельное значение затухания на рабочей длине волны, дБ/км;

8 – количество оптических волокон.

## 4.1 Расчет параметров оптического кабеля

Для расчета используются одномодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП). Для осуществления в данном световоде одномодового режима, необходимо, чтобы нормированная частота  $V$  не превышала 2,4. Величина  $V$  определяется по формуле [5]

$$V = \frac{a\pi}{\lambda}$$

где  $a$  - диаметр сердечника световода;

$\lambda$  - длина волны излучения;

NA - числовая апертура волоконного световода;

Апертура – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

Числовая апертура рассчитывается по формуле

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{1 - (1 - \Delta_n)^2}, \quad (4.2)$$

где  $\theta_a$  - апертурный угол световода;

$n_1$  - показатель преломления сердцевин;  $n_2$  - показатель преломления оболочки.

$\Delta_n$  - относительная разность показателей преломления сердцевин и оболочки.

$$\Delta_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Подставив значения в формулу (4.3) получим

$$\Delta_n = \frac{1,465 - 1,461}{1,465} = 0,002.$$

Зная показатели преломления сердцевин и оболочки, которые указываются заводом – изготовителем ( $n_1 = 1,465$ ,  $n_2 = 1,461$ ,  $\Delta_n = 0,002$ ) можно найти апертурный угол световода подставив значения в формулу (4.2)

$$NA = \sqrt{1,465^2 - 1,461^2} = 0,1008.$$

Согласно рекомендации ITU-T для одномодовых волокон, значение NA должно лежать в пределах от 0,1 до 0,12, что полностью удовлетворено.

Режим работы оптического волокна определяется нормированной частотой. Нормированная частота оптического волокна рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot d_c}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.4)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучателя равная 1,33 мкм;

$d_c$  - диаметр сердцевины оптического волокна, мкм.

В одномодовом волокне наиболее часто встречающийся диаметр жилы составляет порядка 10 мкм.

Определим значение нормированной частоты подставив значения в формулу(3.4), при  $\lambda = 1,53$  мкм

$$V = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14}{1,53 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,008 = 1,94 \quad (4.5)$$

Таким образом в волоконно -оптическом световоде будет существовать одномодовый режим со ступенчатым ППП и параметрами:

а)  $n_1 = 1,465$ ;

б)  $\Delta n = 0,002$ ;

в)  $NA = 0,09$ ;

г)  $a = 10$  мкм;

д)  $\lambda = 1,5$  мкм.

Любой волоконно -оптический световод характеризуется таким немало важным параметром как дисперсия.

Дисперсия - это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса при прохождении по оптическому каналу (ОК). Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон использования световодов, но и снижает дальность передачи по оптическому каналу (ОК), так как чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса [5].

Различают три вида дисперсии волоконного световода:

- межмодовая;
- материальная;
- волноводная.

Модовая дисперсия возникает при распространении в световоде нескольких мод. В одномодовых световодах модовая дисперсия отсутствует.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления материала сердечника от длины волны.

Волновая дисперсия объясняется зависимостью постоянной распространения от длины волны, т.к. источник излучения излучает не строго однудлину некоторый спектр волн, который характеризуется значением спектральной ширины источника  $\Delta\lambda$ .

Материальная дисперсия определяется по следующей формуле [6]

$$\tau_{MAT} = \Delta\lambda \cdot M \quad (4.6)$$

где  $M$ -коэффициент удельной материальной дисперсии для плавленого кварца ( $M = 0,3098$ );

$\Delta\lambda$ - спектральная ширина лазера ( $\Delta\lambda = 2,7\text{нм}$ );

$$\tau_{MAT} = 2,7 \cdot 10^{-9} \cdot 0,3098 = 0,83 \cdot 10^{-9}.$$

Волноводная дисперсия для ступенчатого световода определяется по формуле

$$\tau_{BB} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2n_1^2 \cdot \Delta}{c} \quad (4.7)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

Подставив значения в формулу (4.7) получим

$$\tau_{BB} = \frac{2,7 \cdot 10^{-9}}{1,5 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{2 \cdot 1,465^2 \cdot 0,002}{3 \cdot 10^8} = 0,051 \cdot 10^{-9}$$

Суммарная дисперсия одномодового волоконно - оптического световода является суммой материальной и волноводной дисперсии

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MAT} + \tau_{BB} \quad (4.8)$$

$$\tau_{\Sigma} = 0,83 \cdot 10^{-9} + 0,095 \cdot 10^{-9} = 0,925 \cdot 10^{-9}.$$

С помощью общей дисперсии можно определить ширину полсы пропускания световода  $\Delta F$ . Это величина, обратная к величине уширения импульса при прохождении по оптическому волокну расстояния в 1км

$$\Delta F = \frac{1}{|\tau_{\Sigma}|} \quad (4.9)$$

$$\Delta F = \frac{1}{|0,925 \cdot 10^{-9}|} = 1,08(\text{ГГц/км}).$$

## 4.2 Расчет длины участка регенерации ВОЛС

Длина участка регенерации определяется двумя факторами: дисперсией световода и коэффициентом затухания.

Определим длину участка регенерации по дисперсионной характеристике световода:

$$\frac{\Delta F}{\Delta F_x} = \sqrt{\frac{L_x}{L}} \quad (4.10)$$

где  $\Delta F$  - ширина полосы пропускания 1 км световода;

$\Delta F_x$  - ширина полосы пропускания в конце участка регенерации;

$L$  - строительная длина ( $L = 5$  км);

$L_x$  - длина участка регенерации.

Для дальнейших расчетов примем  $F_x = 620$  МГц. Выразим величину  $L_x$  из формулы (4.10)

$$L_x = \frac{\Delta F^2}{\Delta F_x^2} \cdot L \quad (4.11)$$

$$L_x = \frac{(1,08 \cdot 10^9)^2}{(620 \cdot 10^9)^2} \cdot 5 = 15,1 \text{ (км)}.$$

Теперь необходимо рассчитывать две величины длины участка регенерации по затуханию:

-  $L_{A \text{ MAX}}$  – максимальная проектная длина участка регенерации;

-  $L_{A \text{ MIN}}$  – минимальная проектная длина участка регенерации.

Для оценки величины длин участка регенерации могут быть использованы следующие выражения

$$L_{A \text{ MAX}} = \frac{A_{\text{MAX}} - M - n \cdot A_{\text{PC}}}{A_{\text{OK}} + A_{\text{HC}} / A_{\text{СТР}}}, \quad (4.12)$$

$$L_{A \text{ MIN}} = \frac{A_{\text{MIN}}}{A_{\text{OK}} + A_{\text{HC}} / L_{\text{СТР}}}, \quad (4.13)$$

где  $A_{\text{MAX}}$ ,  $A_{\text{MIN}}$  (дБ) – максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания аппаратуры ВО СП, обеспечивающее к концу срока службы значение коэффициента ошибок не более  $1 \cdot 10^{-10}$ ;

$A_{\text{OK}}$  (дБ/км) – километрическое затухание в оптических волокнах кабеля;

$A_{\text{HC}}$  (дБ) – среднее значение затухания мощности оптического излучения неразъемного оптического соединителя на стыке между строительными длинами кабеля на участке регенерации;

$L_{\text{СТР}}$  (км) – среднее значение строительной длины кабеля на участке регенерации;

$A_{pc}$ (дБ)–затухание мощности оптического излучения разъемного оптического соединителя;

$n$ –число разъемных оптических соединителей на участке регенерации;

$M$ (дБ)–системный запас ВО ЛС по кабелю на участке регенерации.

$$L_{A MAX} = \frac{12-5-2 \cdot 1}{0,22+1/5} = 20,8(\text{км}),$$

$$L_{A MIN} = \frac{3}{0,22 + 1/5} = 12,5(\text{км})$$

### 4.3 Расчет помехо защищенности в когерентных ВОЛС

Отношение сигнал-шум определяется по формуле [12]

$$C - Ш = P\eta / (h f B M^X), \quad (4.14)$$

Где  $P$  – уровень чувствительности;

$h$  – постоянная Планка,  $h=6.62 \cdot 10^{-34}$  (Вт·с/Гц);  $f$  – частота оптического излучения.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,53 \cdot 10^{-6}} = 1,96 \cdot 10^{14}.$$

$\eta$  - квантовая эффективность фотодиода, находим по формуле

$$\eta = \frac{2,7 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 1,96 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{-6}} = 2,1. \quad (4.15)$$

Подставив значения в формулу (4.14), определим отношение сигнал шум

$$\frac{C}{Ш} = \frac{150 \cdot 10^{-9} \cdot 2,1}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 1,96 \cdot 10^{14} \cdot 620 \cdot 10^{14} \cdot 620 \cdot 10^6 \cdot 30} = 130,5(\text{дБ}). \quad (4.16)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе были произведены обоснования проектирования высокоскоростного защищенного канала связи используя технологию visible light communication. В работе был сделан анализ сети Li-fi, его преимущества и недостатки. В качестве выбора используемого оборудования было отдано предпочтение компании PureLiFi и ее новой разработке Li-Fi X. Обоснование выбора оборудования производилось с учетом: технических характеристик, возможностей применения, стоимости и так далее. В технической части проекта рассмотрен вариант построения сети беспроводного доступа с установлением шести точек доступа. Выбор обусловлен условиями технических параметров оборудования. В расчетной части дипломного проекта произведены расчеты ширины полосы пропускания и скорости передачи данных.

В разделе безопасности и жизнедеятельности был проведен анализ условий труда, расчет микроклимата и подобран кондиционер.

В экономической части дипломного проекта был представлен бизнес-план проектируемой системы с указанием экономического эффекта и срока окупаемости проекта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Неволин, Д.Г. Помехо устойчивость беспроводных оптических локальных сетей передачи данных на базе свето диодов видимого излучения: монография/Д. Г. Нево лин, И. П. Петрусь.– Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 144 с.
- 2 Latif Ullah Khan. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. Department of Electrical Engineering. University of Engineering & Technology. Peshawar. Volume 3, Issue 2, May 2017, Pages 78-88.
- 3 Архипов. А. Проектирование и разработка энергосберегающих светодиодных систем освещения / А.Архипов // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – № 2. – С. 42–45.
- 4 Алексеев. Д.А. Li-Fi — прорыв в науке или бесполезная игрушка? Преимущества и недостатки Li-Fi перед Wi-Fi / Д.А.Алексеев, В.В. Ермолаева. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 11 (91). — С. 161-164.
- 5 Виноградов В.В., Котов В.К., Нуприк В.Н. Волоконно -оптические линии связи. - М.: ИПК «Желдо риздат», 2002. - 278 с.  
Андреев В.А., Бурдин А.В., Кочановский Л.Н. и др.; Под ред.
- 6 в. В 2-х томах. Том 2 — Проектирование, строительство и техническая эксплуатация / — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Горячая линия—Телеком, 2010. — 424 с.: ил.
- 1 СанПин2.2.4.548-96 в РК. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 2 Ананьев В.А., Балужева Л.Н., Гальперин А.Д. и др. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика: Учебное пособие. – Москва: Евроклимат Изд-во «Арина», 2000. – 416 с.
- 3 Хакимжано в Т.Е. Охрана труда: Учебное пособие для ВУЗо в. – Алматы: Эверо, 2006. – 264 с.
- 4 Базылов К.Б., Алибаева С.А., Бабич А.А. Экономика предприятия. Методические указания по выполнению семестровых работ для студентов специальности 5В071900- Радиотехника, электроника и телекоммуникации. Алматы. АУЭС, 2013. -31с.
- 5 Гальчина Н. А. Мощные белые светодиоды и модули на их основе для целей освещения / Н. А. Гальчина [и др.] // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 26–28.
- 6 Дмитриев А.Л. Оптические системы передачи инфо Андреева В.А. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов: учеб пособие / А.Л. Дмитриев. – СПб. : СПбГУИТМО, 2007. – 65 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Код программы «Расчёт полосы пропускания свето диодов»**

```
unit Unit1; interface uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
StdCtrls, ExtCtrls, XPMan;
type
TForm1 = class(TForm) Edit1: TEdit;
Edit2: TEdit;
Edit3: TEdit;
Button1: TButton;
Label1: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel; Edit4: TEdit; Button2: TButton; Label4: TLabel; Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
XPManifest1: TXPManifest; Image1: TImage;
procedure Button2Click(Sender: TObject); procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
{ Private declarations } public
{ Public declarations } end;
var
Form1: TForm1;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject); begin
close; end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject); begin
Edit4.Text := FloatToStr(StrToFloat(trim(Edit1.Text) +
StrToFloat(trim(Edit2.Text)) + StrToFloat(trim(Edit3.Text))) + 'Гц');
end;
end.
```

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу  
(наименование вида работы)

Кушалиева Динара Айдаркызы  
(Ф.И.О. обучающегося)

6B06201 – Телекоммуникация  
(шифр и наименование ОП)

На тему: Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi

Выполнено:

- а) графическая часть на 10 листах  
б) пояснительная записка на 71 страницах

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Общая характеристика работы:

Дипломная работа Кушалиевой Динары Айдаркызы посвящена разработке высокоскоростного канала связи на основе перспективных технологий VLC (Visible Light Communication) и Li-Fi. В условиях быстрого развития информационно-коммуникационных технологий данная работа актуальна и направлена на изучение и разработку высокоскоростных методов передачи данных, что является значимым для отрасли телекоммуникаций.

Положительные стороны работы:

Автор работы продемонстрировала высокий уровень подготовки, выполнив глубокий анализ существующих технологий и детально исследовав принципы работы VLC и Li-Fi. Работа содержит теоретическое обоснование, анализ преимуществ и недостатков применяемых технологий, а также практически ориентированные рекомендации по внедрению. Автор грамотно использует современные научные подходы и методологии, что подтверждает её компетентность в данной области.

Замечания:

Несмотря на общее высокое качество, в работе присутствуют незначительные недочёты. Например, можно было бы подробнее остановиться на ограничениях VLC и Li-Fi в условиях практической эксплуатации. Также некоторые разделы могли бы быть структурированы более логично для повышения читаемости и наглядности материала.

### Оценка работы

Дипломная работа оценена на 83 баллов В (хорошо), и рекомендую Кушалиеву Динару Айдаркызы к присвоению академической степени бакалавра по образовательной программе 6B06201 «Телекоммуникация» в области «информационно-коммуникационных технологий»

### Рецензент

Доцент АУЭиС им. Г. Даукеева  
кандидат технических наук

Ермекбаев М.М.  
« 7 » 11 2024г.



## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу  
Кушалиева Динара Айдаркызы  
6B06201 – Телекоммуникация

Тема: Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi

Работа является важной для развития телекоммуникационных технологий, предлагая инновационные решения для передачи данных с высокой скоростью и надёжностью.

В ходе выполнения работы студентка продемонстрировала высокий уровень теоретических знаний и практических навыков. Она детально изучила основные аспекты работы технологий VLC и Li-Fi, а также их применимость для создания высокоскоростных каналов связи. Анализ современных источников и применение передовых методов проектирования подтверждают высокий уровень подготовки Кушалиевой Д.А.

Положительным аспектом работы является тщательная проработка математических моделей передачи данных и практическое моделирование предложенной системы. Студентка провела качественную обработку данных и продемонстрировала способность к аналитическому мышлению и решению сложных технических задач.

Вместе с тем, в работе имеются незначительные замечания, касающиеся оформления некоторых разделов и более глубокого анализа возможных проблем практической реализации технологии Li-Fi в условиях реальной эксплуатации. Однако данные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Дипломная работа Кушалиевой Динары Айдаркызы на тему «Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi» соответствует всем требованиям, предъявляемым к дипломным работам студентов по направлению «Телекоммуникация». Дипломная работа оценена на 85 баллов В+ (хорошо), и рекомендую Кушалиеву Динару Айдаркызы к присвоению академической степени бакалавра по образовательной программе 6B06201 «Телекоммуникация» в области «информационно-коммуникационных технологий»

**Научный руководитель**

Ассоциированный профессор  
кафедры ЭТиКТ, к.ф-м.н.

Жунусов К.Х.

«11» \_\_\_\_\_ 2024 г.



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кушалиева Динара Айдаркызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi

**Научный руководитель:** Канат Жунусов

**Коэффициент Подобия 1:** 3.4

**Коэффициент Подобия 2:** 0.7

**Микропробелы:** 8

**Знаки из других алфавитов:** 1

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

7.11.2024 г.  
Дата

Маркесина С

проверяющий эксперт

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кушалиева Динара Айдаркызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi

Научный руководитель: Канат Жунусов

Коэффициент Подобия 1: 3.4

Коэффициент Подобия 2: 0.7

Микропробелы: 8

Знаки из здругих алфавитов: 1

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

7.11.2024 г.  
Дата



Заведующий кафедрой



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Кушалиева Динара Айдарқызы**

**Тақырыбы: Проектирование высокоскоростного канала связи с использованием технологий VLC и Li-Fi**

**Жетекшісі: Канат Жунусов**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.4**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.7**

**Дәйексөз (35): 0**

**Әріптерді ауыстыру: 1**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 8**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

7.11.2024 ж  
Күні



Кафедра меңгерушісі

Маркетер С  
