

**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

Шакир Акмардин Шухратұлы

«Исследование системы оптической беспроводной связи для внутреннего
использования»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M06202 – «Телекоммуникация»

Научный консультант:
Смайлов Н.К., доктор PhD,
профессор

Алматы, 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт автоматики и информационных технологий

УДК 621.396.96: 004.738.5

На правах рукописи

Шакир Акмардин Шухратұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание академической степени магистра

Название диссертации:

Исследование системы оптической беспроводной
связи для внутреннего использования
7M06202 – Телекоммуникация

Направление подготовки:

Рецензент

PhD доктор, ассоциированный профессор
 Көшкінбаев С.Ж

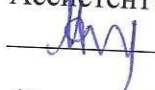
«22» 06 2025 г.

Научный руководитель

PhD доктор, профессор
 Смайлов Н.К

«22» 05 2025 г.

Нормоконтроль

Ассистент каф. ЭТиКТ, м.т.н.
 Маткаримова А.А.

«22» 05 2025 г.



Алматы 2025

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

7M06202 - Телекоммуникация



ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Шакир Акмардину Шухратұлы

Тема диссертации: «Исследование системы оптической беспроводной связи для
внутреннего использования»

Утверждена приказом Ректора Университета № 133-П/0 «28» 03 2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации: «30» 05 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Для проведения моделирования
использованы следующие исходные параметры: мощность LED-источника – 1–2 Вт, угол
полусвета – 60° , чувствительность фотоприёмника – 0.5 А/Вт, активная площадь
приёмника – 1 см², ширина полосы приёма – 20 МГц, температура среды – 300 К, тёмный
ток – 1 нА, сопротивление нагрузки – 1000 Ом, коэффициент отражения стен – 70 %,
расстояние между передатчиком и приёмником – от 0.5 до 5 м, углы ориентации – от 0° до
 30° . Математическое моделирование выполнено в среде MATLAB с применением
уравнений расчёта освещённости, коэффициента передачи канала, отношения сигнал/шум
(SNR), шумовой дисперсии, вероятности битовой ошибки (BER) и предельной дальности
устойчивой связи.

Перечень вопросов, рассмотренных в диссертационной работе: а) Провести обзор
современных разработок и тенденций в области VLC; б) Разработать математическую
модель системы VLC для внутренних помещений; в) Оценить эффективность
разработанной модели на основе сравнительного анализа.

Рекомендуемая основная литература:

1 Matheus, L.E.M., et al. "Visible Light Communication: Concepts, Applications and
Challenges." IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, 2019, pp. 3204–3237.

2 A. Poulouse, "Simulation of an Indoor Visible Light Communication System Using
Optisystem," *Signals*, vol. 3, no. 4, pp. 765–793, 2022.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Провести обзор современных разработок и тенденций в области VLC.	18.02.2025 - 20.03.2025	Выполнено
Разработать математическую модель системы VLC для внутренних помещений	20.03.2025 - 17.04.2025	Выполнено
Оценить эффективность разработанной модели на основе сравнительного анализа.	17.04.2025 - 19.05.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

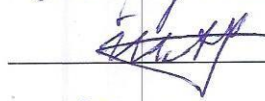
Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	PhD доктор, профессор кафедры ЭТиКТ Смайлов Н.К.	19.04.2025	
Основная часть	PhD доктор, профессор кафедры ЭТиКТ Смайлов Н.К.	2.05.2025	
Стандартизация/нормоконтроль	М.т.н., ассистент каф. ЭТиКТ, Маткаримова А.А.	22.05.25	

Научный руководитель



Смайлов Н.К.

Задание принял к исполнению обучающийся



Шакир А.Ш.

Дата

« 30 » 03 2024г.

АННОТАЦИЯ

В данной работе проведено исследование системы оптической беспроводной связи на основе технологии VLC (Visible Light Communication) для применения в замкнутых пространственных средах. Рассмотрены принципы модуляции и передачи информации с использованием видимого спектра, а также особенности функционирования систем, основанных на светодиодных источниках и фотодетекторах. Выполнён анализ факторов, влияющих на надёжность и пропускную способность канала: геометрия помещения, отражающие свойства поверхностей, уровень внешнего освещения. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность VLC в задачах организации высокоскоростных и помехоустойчивых каналов связи в условиях внутренней инфраструктуры.

АНДАТПА

Бұл жұмыста жабық кеңістіктік ортада пайдалану үшін VLC (Visible Light Communication) технологиясына негізделген оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерттеу жүргізілді. Көрінетін спектрді пайдалана отырып, ақпаратты модуляциялау және беру принциптері, сонымен қатар жарықдиодты көздер мен фотодетекторлар негізіндегі жүйелердің жұмыс істеу ерекшеліктері қарастырылады. Арнаның сенімділігі мен өткізу қабілетіне әсер ететін факторларға талдау жасалды: бөлменің геометриясы, беттердің шағылыстыру қасиеттері, сыртқы жарықтандыру деңгейі. Ішкі инфрақұрылым жағдайында жоғары жылдамдықты және шуға төзімді байланыс арналарын ұйымдастыру тапсырмаларында VLC тиімділігін растайтын модельдеу нәтижелері ұсынылған.

ANNOTATION

This study investigates an optical wireless communication system based on Visible Light Communication (VLC) technology for use in indoor environments. The principles of data modulation and transmission using the visible light spectrum are examined, along with the operational characteristics of systems employing LED light sources and photodetectors. Factors affecting the reliability and bandwidth of the communication channel—such as room geometry, reflective surface properties, and ambient lighting levels—are analyzed. Modeling results are presented, demonstrating the effectiveness of VLC technology in establishing high-speed and interference-resistant communication channels within indoor infrastructures.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Обзор современных методов и средств оптической беспроводной связи	12
1.1 Анализ современных исследований и направлений развития систем VLC	12
2 Математическое моделирование систем видимой оптической беспроводной связи	33
2.1 Канальная модель VLC-системы	33
2.2 Архитектура и компоненты систем VLC для помещений	41
3 Анализ эффективности и перспективы применения систем VLC	47
3.1 Сравнительный и прикладной анализ параметров систем VLC на основе разработанной математической модели	47
3.2 Масштабируемость и применение модели VLC-канала в распределённых системах	51
3.3 Отраслевые сценарии применения VLC	53
Заключение	60
Нормативные ссылки	62
Обозначения и сокращения	63
Список использованных источников	64
Приложение А	71

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния научной проблемы.

Оптическая беспроводная связь (ОБС) – это инновационное направление развития телекоммуникаций, в котором информация передаётся посредством оптического излучения, чаще всего в диапазоне видимого света. В условиях стремительного роста объёмов передаваемой информации и дефицита радиочастотного спектра, традиционные технологии беспроводной связи, основанные на использовании радиоволн, начинают сталкиваться с ограничениями по пропускной способности, электромагнитной совместимости и уровню безопасности. Эти ограничения особенно проявляются в помещениях с высокой плотностью подключённых устройств – в офисах, конференц-залах, медицинских учреждениях, учебных аудиториях, на промышленных объектах. В таких условиях возрастает актуальность внедрения альтернативных беспроводных технологий, одной из которых является VLC (Visible Light Communication) – система связи, использующая модуляцию света от светодиодов для передачи данных.

Развитие VLC обусловлено не только растущими требованиями к скорости и безопасности, но и технологическими сдвигами: массовым применением LED-освещения, удешевлением фотоприёмников и увеличением производительности микроконтроллеров. По сравнению с радиочастотной передачей, оптические системы обладают высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, отсутствием вредных излучений, а также физическим ограничением распространения сигнала в пределах помещения, что существенно повышает уровень информационной безопасности. Кроме того, VLC может быть интегрирована в уже существующую осветительную инфраструктуру, снижая затраты на установку дополнительного оборудования.

Тем не менее, несмотря на активное развитие VLC и Li-Fi технологий, существует ряд нерешённых научно-технических проблем, сдерживающих их массовое внедрение. Среди них – отсутствие универсальной модели распространения сигнала в помещении, недостаточная устойчивость к фоновому освещению, ограничения, связанные с направленностью оптического канала и необходимостью прямой видимости. Также остаются актуальными вопросы оптимального размещения источников и приёмников, выбора модуляционных схем, оценивания уровня ошибок (BER) и освещённости, а также определения предельной скорости передачи данных в условиях конкретных архитектурных конфигураций. Всё это требует системного и математически обоснованного подхода к построению и исследованию таких систем.

Актуальность исследования и формулировка проблемы.

В последние годы наблюдается качественный сдвиг в области беспроводных технологий: всё больше систем переходит на новые принципы

передачи данных, связанные не только с увеличением скорости, но и с необходимостью повышения энергоэффективности, кибербезопасности и устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям. Особенно остро эти требования проявляются при организации связи в замкнутых пространствах, таких как офисы, учебные аудитории, производственные участки и медицинские учреждения. Здесь критически важна стабильность соединения, минимальный уровень задержек и отсутствие перекрёстных помех, что в ряде случаев не может быть достигнуто при использовании традиционных радиочастотных технологий (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и др.).

Оптическая беспроводная связь (ОБС), и особенно технология связи на основе видимого света (VLC), является альтернативным направлением, способным частично или полностью решить указанные проблемы. VLC использует светодиодные осветительные приборы (LED) для одновременного обеспечения освещения и передачи данных. Такой подход обладает рядом конкурентных преимуществ: высокая пропускная способность, отсутствие радиочастотных помех, физическая локализация сигнала в пределах помещения (что затрудняет перехват), энергоэффективность и интеграция с существующей осветительной инфраструктурой.

Актуальность исследования возрастает также в контексте перехода к технологиям умного дома, интеллектуальных зданий, автоматизированных производств и концепции «интернета вещей» (IoT), где требуются надёжные, масштабируемые и защищённые каналы связи. Современные требования к безопасности информации, электромагнитной совместимости и энергопотреблению делают VLC одним из наиболее перспективных решений для внутреннего использования. Особенно важным является тот факт, что эта технология безопасна для здоровья и может использоваться в средах, чувствительных к электромагнитному излучению – например, в операционных блоках, самолетах или на промышленных объектах с потенциально взрывоопасной атмосферой.

Однако внедрение VLC-технологии в массовую практику сдерживается рядом научно-технических барьеров. Отсутствует универсальная модель распространения оптического сигнала в типовых помещениях с различной геометрией и отражающими свойствами поверхностей. Не стандартизированы методы расчёта производительности системы в зависимости от уровня освещённости, угла падения и приёма сигнала, взаимного расположения светильников и датчиков. Влияют также параметры модуляции, фоновые световые шумы, подвижность приёмника и другие факторы, критичные для систем реального времени. В условиях отсутствия прямой видимости (LoS) и наличия отражений (NLoS) резко изменяются характеристики сигнала, что требует построения адаптивных моделей расчёта BER, SNR и других ключевых метрик качества связи.

Таким образом, проблема исследования заключается в необходимости разработки комплексной математической и программной модели системы

оптической беспроводной связи для внутреннего использования, способной учитывать все значимые физические, пространственные и технические параметры. Кроме того, важно экспериментально подтвердить работоспособность предложенной модели и сформулировать рекомендации по оптимальному размещению оборудования и выбору параметров системы в реальных условиях.

Решение данной проблемы позволит не только повысить эффективность и устойчивость VLC-сетей, но и приблизить практическое внедрение таких систем в повседневную жизнь, промышленную автоматизацию и образовательные учреждения.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки и патентных исследованиях.

В рамках выполнения диссертации был проведён обзор современных научных публикаций и патентных разработок в области оптической беспроводной связи, включая технологии VLC и Li-Fi. Анализ показал, что несмотря на наличие значительного объёма теоретических и экспериментальных работ, не предложено универсального решения, обеспечивающего высокую надёжность передачи данных в условиях динамического освещения и различных геометрий помещений. Проведённые патентные исследования подтверждают отсутствие зарегистрированных методов комплексного моделирования параметров VLC-систем с учётом пространственно-временных и фотометрических характеристик сигнала.

Новизна темы заключается в том, что:

- проведено комплексное математическое моделирование параметров оптического канала VLC-системы с учётом мощности сигнала, чувствительности приёмника, угла обзора, интерференции и фонового освещения;

- разработана аналитическая модель передачи данных по каналу VLC, интегрирующая расчёт освещённости, BER и SNR в условиях различной конфигурации помещений;

- предложен подход к включению архитектурных и фотометрических характеристик пространства в вычисление параметров VLC-связи, что позволяет прогнозировать производительность системы;

- выполнен сравнительный и прикладной анализ эффективности систем VLC на основе модели, включая сценарии масштабируемости и отраслевого применения (медицина, образование, промышленность).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование и математическое моделирование системы оптической беспроводной связи для внутреннего применения, направленное на повышение эффективности передачи данных, устойчивости канала и оптимальности конфигурации компонентов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

– провести обзор современных методов и средств оптической беспроводной связи, с акцентом на технологии VLC, выявить их преимущества, ограничения и актуальные направления развития.

– разработать математическую модель системы VLC для внутренних помещений, включая расчёт мощности сигнала, уровня BER, чувствительности приёмника и влияние внешних факторов (угол обзора, интерференция, освещённость).

– оценить эффективность разработанной модели на основе сравнительного анализа, исследовать возможности масштабирования и рассмотреть прикладные сценарии применения VLC в различных отраслях.

Объектом исследования является процесс передачи информации в системах оптической беспроводной связи внутри помещений.

Предметом исследования являются физико-математические закономерности распространения и приёма оптического сигнала в системах VLC, а также особенности их применения в замкнутых помещениях различной конфигурации.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретического анализа, математического моделирования параметров оптического канала, расчёта освещённости, BER и SNR, а также численные методы аппроксимации, аналитических оценок и оптимизации геометрии конфигурации системы VLC в помещении. Моделирование параметров производилось с использованием пакета MATLAB.

Практическая значимость полученных результатов.

Результаты проведённого исследования имеют выраженное прикладное значение в контексте разработки и внедрения высокоэффективных систем внутренней беспроводной связи нового поколения. Разработанная математическая модель VLC-системы позволяет с высокой точностью прогнозировать поведение оптического канала связи в условиях конкретных помещений, учитывая геометрию пространства, характеристики источников света, параметры приёмников и уровень внешнего освещения. Это обеспечивает возможность рационального выбора конфигурации оборудования ещё на этапе проектирования, снижая затраты на установку и настройку.

Алгоритмы расчёта показателей качества связи, таких как BER, уровень освещённости и сигнал/шум (SNR), могут быть использованы при планировании распределения светильников и фотодетекторов, обеспечивая оптимальное покрытие и надёжную передачу данных. Полученные результаты позволяют повысить устойчивость передачи информации в условиях изменяющейся освещённости, препятствий и многолучевого распространения, что особенно важно в интеллектуальных зданиях и промышленных помещениях.

Практическая значимость работы проявляется также в возможности использования разработанных моделей и алгоритмов при создании

адаптивных VLC-сетей для офисов, образовательных учреждений, медицинских и производственных объектов. Кроме того, результаты могут быть интегрированы в системы «умного дома», «интернета вещей» и промышленных автоматизированных комплексов в качестве высокоскоростного и безопасного канала обмена данными.

В образовательной и исследовательской среде предложенная система может применяться для подготовки специалистов в области телекоммуникаций, фотоники и информационной безопасности, обеспечивая наглядное моделирование и анализ характеристик оптических беспроводных каналов связи.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель внутренней VLC-системы, учитывающая отражения, углы приёма и освещённость;
- аналитические зависимости для расчёта BER и уровня освещённости при различных конфигурациях источников и приёмников;
- метод оценки эффективности размещения компонентов VLC-системы в помещении с учётом геометрии и оптических характеристик среды;
- результаты сравнительного анализа параметров VLC-системы в различных сценариях использования;
- рекомендации по практическому применению VLC-технологий в условиях интеллектуальных зданий, промышленных и образовательных объектов.

Апробация результатов магистерской диссертации. Магистерская работа состоит из введения, трех разделов, выводов и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 73 страницы, магистерская работа содержит 6 рисунков и 1 приложение. Список использованных источников насчитывает 87 наименований. Приложение содержит листинг программной модели.

1 Обзор современных методов и средств оптической беспроводной связи

1.1 Анализ современных исследований и направлений развития систем VLC

В работе [1] представлено исследование системы внутреннего позиционирования, основанной на использовании технологии видимой световой связи (Visible Light Communication, VLC). Основное внимание уделено реализации и анализу прототипа, обеспечивающего определение координат объекта в замкнутом помещении за счёт обработки световых сигналов от нескольких светодиодных источников. Данный подход рассматривается как альтернатива традиционным радиочастотным методам позиционирования, испытывающим трудности в условиях интерференции и перегрузки спектра.

Конструкция предложенной системы включает четыре светодиода (LED), каждый из которых модулируется на уникальной частоте (1, 3, 5 и 7 кГц), и один фотодиодный приёмник, подключённый к микроконтроллеру ARM Cortex-M4. Модуляция сигнала осуществляется таким образом, чтобы приёмник мог различить сигнал каждого источника по частотной составляющей, выделенной с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT). Это позволяет в реальном времени определить относительную интенсивность каждого сигнала и рассчитать расстояния от приёмника до источников излучения.

Математическая модель системы основана на уравнении Ламберта и учитывает угол приёма, расстояние до источника и геометрию размещения светильников. Расстояния вычисляются по принципу метода RSS (Received Signal Strength), после чего координаты объекта определяются с помощью трилатерации. Экспериментальная часть включает тестирование системы в помещении по сетке из 49 точек, что позволило провести количественную оценку точности.

Средняя ошибка позиционирования составила 0,3941 метра, при этом минимальная ошибка достигала 0,0219 метра, а максимальная – 1,0267 метра. Такие результаты свидетельствуют о высокой потенциальной точности VLC-систем в условиях прямой видимости (LoS). Однако в работе подчёркивается чувствительность системы к затенению сигнала, смещению углов приёма и фоновому освещению, что требует дальнейшего усовершенствования аппаратных и программных компонентов.

Таким образом, статья делает значимый вклад в развитие VLC-ориентированных систем навигации, демонстрируя техническую реализуемость и перспективность применения световой связи для задач позиционирования в помещениях. Полученные результаты могут быть

полезны для разработки решений в области логистики, робототехники, внутренней навигации и безопасности.

В работе [2] представлен инновационный подход к созданию системы оптической беспроводной связи для персональных зон, совмещающей функции высокоскоростной передачи данных и локализации абонента с возможностью определения высоты его расположения. Исследование направлено на решение проблемы ограниченного радиуса действия оптических систем, обусловленного требованиями безопасности, и на необходимость точного позиционирования пользователя в трехмерном пространстве.

Авторы обосновывают актуальность применения оптической беспроводной технологии в условиях персональных пространств, таких как жилые и рабочие помещения, где особенно востребована мобильность и высокая пропускная способность. В отличие от радиочастотных решений, оптические системы обладают высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, обеспечивают конфиденциальность (сигнал не проникает сквозь стены) и соответствуют санитарным нормативам при правильной настройке излучения.

В рамках предложенного метода используется система с одноканальным имидж-рецептором, позволяющим реализовать функцию «поиска и сканирования». Измеряя мощность принятого сигнала и углы его прихода, система способна точно определить, как горизонтальные координаты пользователя, так и его высоту относительно оптического передатчика. Это стало возможным благодаря совмещённому анализу геометрической оптики и экспериментально откалиброванных моделей распространения света в заданной среде.

Экспериментальная установка включала в себя волоконно-оптический передатчик с MEMS-зеркалом, объектив, фотодиод на подвижной платформе и систему сбора данных на базе LabView и FPGA. В условиях переменного освещения и сильного фоновых шума авторы добились средней точности локализации порядка 4,73 см и ошибки в определении высоты около 4,86 см, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного метода.

Практическая значимость данного исследования заключается в возможности интеграции локализационной системы с уже существующими оптическими каналами передачи данных, что особенно актуально для реализации беспроводных сетей нового поколения в условиях плотной застройки, офисных комплексов и интеллектуальных домов. Результаты могут быть использованы при проектировании решений для точного позиционирования в средах с высокими требованиями к безопасности, таких как медицинские учреждения или промышленные помещения.

Таким образом, в работе [2] продемонстрирована жизнеспособность интегрированной системы связи и позиционирования на базе оптических

технологий, что открывает новые перспективы в области высокоскоростных и безопасных персональных сетей.

В работе [3] представлены теоретические и экспериментальные основы анализа беспроводных оптических связей в масштабах микросхем (on-chip optical wireless links), что отражает современное направление исследований в области высокоскоростной передачи данных и архитектуры интегральных систем. Основное внимание уделено вопросам кросс-слоистого проектирования, методам моделирования межкомпонентных помех, а также точной оценке вероятности битовой ошибки в условиях когерентной и некогерентной интерференции.

Исследование демонстрирует применение стохастических моделей и точных аналитических выражений для расчёта битовых ошибок при наличии внутрисистемных оптических перекрёстных наводок. Это позволяет учитывать сложные физические и логические взаимодействия внутри мультикристальных архитектур, в том числе при плотной упаковке оптических каналов передачи. В модели учитываются такие параметры, как задержки распространения, смещения фаз, характеристики передающих и приёмных элементов, а также спектральные свойства оптических сигналов.

Работа интересна тем, что предлагает сравнительный анализ между точными и приближенными оценками BER (bit error probability), применяя сложные функции ошибок (erfc), многочленные разложения Хермита и аппроксимации с использованием порогов МоЕ и АОР. Это подчёркивает высокий уровень математической строгости и позволяет интегрировать такие модели в автоматизированные системы анализа связи внутри SoC.

Кроме того, в статье рассмотрены аспекты оптимального проектирования приёмников с учётом влияния перекрёстных искажений в WDM-среде, а также использование метода трассировки лучей и анализ лазерных источников для передачи данных со скоростями до гигабит в секунду. Таким образом, представленные материалы служат ценной основой для будущих исследований в области миниатюрных VLC-систем и их применения в высокоинтегрированных электронных платформах.

Работа [3] позволяет расширить рамки традиционного представления об оптической беспроводной связи, углубляясь в микроуровень реализации, что особенно актуально в контексте IoT-устройств, edge computing и перспективной архитектуры Network-on-Chip.

В работе [4] Wavelet–Artificial Neural Network Receiver for Indoor Optical Wireless Communications авторов S. Rajbhandari, Z. Ghassemloooy и M. Angelova представлено исследование высокоэффективного приёмного тракта для систем оптической беспроводной связи в помещениях. Основное внимание уделено сочетанию двух технологий – дискретного вейвлет-преобразования (DWT) и искусственной нейронной сети (ANN) – для устранения межсимвольной интерференции (ISI) и помех от

люминесцентного освещения (FLI), что является важной задачей для повышения качества передачи данных в условиях рассеянного канала.

В отличие от традиционных методов фильтрации, таких как цифровые полосовые или высокочастотные фильтры, предлагаемый подход с использованием DWT позволяет избирательно подавлять низкочастотные компоненты, обусловленные FLI, без потерь полезного сигнала. При этом ANN используется для адаптивной эквалазации, компенсируя эффект рассеяния сигнала и межсимвольной интерференции, возникающей при высокой плотности отражений в помещении. ANN рассматривается как инструмент классификации, способный эффективно определять переданные биты по наблюдаемым векторам, особенно при использовании многослойного персептрона с обучением на основе алгоритма Левенберга–Маркуардта.

В статье проведено сравнение нескольких схем модуляции – ООК, PPM и DPIM – с различными вариантами обработки (жёсткое и мягкое принятие решений), где показано, что использование DWT и ANN значительно снижает требования к оптической мощности для достижения заданного уровня ошибок. В частности, PPM с мягким принятием решений демонстрирует лучшую устойчивость как к FLI, так и к ISI по сравнению с другими схемами. При этом наблюдается существенное снижение оптических потерь до 7–12 дБ в зависимости от типа модуляции и скорости передачи.

Особое внимание уделено практической реализации предложенной архитектуры на DSP-плате TI TMS320C6713 с использованием Simulink-моделей. Эксперименты подтвердили высокую точность соответствия моделированию и реальному функционированию. Полученные результаты BER и графики ошибок показывают высокую воспроизводимость алгоритмов на аппаратном уровне.

Таким образом, работа [4] представляет собой значительный вклад в развитие интеллектуальных приёмников для систем VLC и Li-Fi в помещениях, предлагая адаптивную архитектуру, эффективно справляющуюся с интерференцией и отражениями в реальных условиях эксплуатации.

В работе [5] рассмотрены методы повышения скорости передачи данных в системах видимой оптической связи в помещениях, где особое внимание уделяется применению методов адаптивного цифрового эквалайзинга в частотной области для систем с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM). Основная цель исследования – улучшение производительности видимых световых коммуникаций (VLC) в условиях интерференции, многолучевости и ограничений канала.

Авторы анализируют эффективность использования предварительного цифрового эквалайзера в частотной области для подавления искажений, вызванных эффектами распространения в помещении. Сравнение между

традиционным подходом без эквалайзера и предлагаемым решением показывает, что предложенный метод значительно снижает битовую ошибку (BER) и улучшает стабильность передачи при различных условиях освещения и архитектуре освещающих элементов.

В статье также рассматриваются вопросы модуляции и демодуляции сигнала, методы оптимального размещения светодиодов, а также типы эквалайзеров, включая многорезонансные решения. Показано, что эквализация в домене частоты, адаптируемая к текущему состоянию канала, способна эффективно компенсировать частотные искажения и отражения, возникающие в условиях помещения.

Теоретическая часть подкреплена экспериментальными результатами, представленными в виде графиков зависимости BER от отношения сигнал/шум (SNR) при различных типах эквалайзеров. Авторы демонстрируют, что предложенная система обеспечивает повышение качества связи при высоких скоростях передачи данных, что делает её перспективной для интеграции в будущие системы беспроводной связи на основе света.

Таким образом, данная статья делает существенный вклад в развитие направлений, связанных с адаптивными методами обработки сигналов в VLC-системах, и может быть использована при разработке высокоскоростных оптических систем связи в помещениях, особенно при построении гибридных IoT-сетей.

В работе [6] представлен подробный анализ эффективности применения искусственных нейронных сетей (ANN) для эквализации сигналов в системах видимой оптической связи (VLC) в помещениях, особенно в конфигурациях без прямой видимости (NLOS). Основной акцент сделан на снижении межсимвольной интерференции (ISI) и компенсации нелинейностей, возникающих в светодиодах и канале связи, при помощи алгоритма обратного распространения ошибки на основе метода Левенберга–Маркуардта (LM).

Авторы исследуют производительность системы в зависимости от порядка амплитудно-импульсной модуляции (PAM) и числа скрытых нейронов в ANN. Рассматриваются схемы 2-, 4-, 8-, 16- и 32-PAM, с нейросетевыми структурами, содержащими от 4 до 20 нейронов. Анализируются значения битовой ошибки (BER) при различных значениях отношения сигнал/шум (SNR) и на разных расстояниях передачи (1, 3 и 6 метров). Наилучшие результаты достигаются на 1 м: при использовании ANN эквалайзера с 5 нейронами ошибка BER достигает уровня 10^{-4} при SNR-потере всего 0,5 дБ, что значительно ниже порога прямой коррекции ошибок (FEC).

Работа содержит также сравнительный анализ различных алгоритмов обучения нейросетей, включая LM, BFGS quasi-Newton, resilient backpropagation (RP) и gradient descent (GD). LM показал наилучшие

результаты по минимизации ошибки и стабильности при высоких скоростях передачи (1 Мбит/с). Результаты экспериментов и моделирования подтверждают, что использование ANN существенно снижает требования к SNR и улучшает устойчивость передачи при высоких скоростях и нестабильных канальных условиях.

Авторы подчёркивают, что ANN-подход может быть применён не только на стороне приёмника, но и на передающей стороне, что расширяет возможности оптимизации канала связи. Кроме того, такие методы, как предварительная эквализация и глубокое обучение, демонстрируют потенциал в преодолении ограничений полосы пропускания и нелинейных искажений в системах VLC.

Таким образом, работа [6] вносит вклад в развитие адаптивных интеллектуальных приёмников и предэквалайзеров, подтверждая применимость машинного обучения и нейросетевых решений для повышения производительности оптической связи в помещениях. Исследование демонстрирует, что подходы на основе ANN являются эффективным инструментом для улучшения качества связи в условиях многолучевого распространения и ограниченного спектра.

В работе [7] (Investigation of Outage Probability and AP Placement for Mobile Users in Indoor VLC System Design) проведено теоретическое и моделирующее исследование вероятности обрыва связи (outage probability) в помещениях при использовании систем видимой световой связи (VLC) с мобильными пользователями. Авторы акцентируют внимание на проблемах проектирования точек доступа (Access Points – APs), сочетающих функции освещения и высокоскоростной передачи данных, особенно в условиях, когда пользователь может перемещаться по помещению, изменяя своё положение, ориентацию и высоту.

В отличие от статичных VLC-сценариев, где соединение обеспечивается между фиксированным передатчиком и приёмником в зоне прямой видимости, здесь рассматривается случай с перемещающимися устройствами, которым требуется бесшовная передача соединения (handover) между соседними зонами покрытия. Авторы разрабатывают вероятностную модель, позволяющую количественно оценить вероятность потери связи в зависимости от расстояния между AP, скорости пользователя и времени передачи соединения (handover delay).

Предложенная модель анализирует геометрию зон перекрытия соседних ячеек и рассчитывает точку выхода пользователя за пределы зоны освещения. На основе этой модели получены как точная формула (через симуляции), так и аналитически выведенное верхнее ограничение на вероятность обрыва связи. Авторы также представляют критические параметры, такие как радиус зоны покрытия, угол поля зрения приёмника, угол движения пользователя и расстояние между центрами AP, – и демонстрируют, как эти параметры влияют на уровень надёжности передачи.

Моделирование показывает, что уменьшение расстояния между AP и сокращение времени handover приводит к значительному снижению вероятности обрыва. Однако авторы подчёркивают существование компромиссов между плотностью размещения точек доступа и их световыми функциями: слишком частое размещение может нарушать нормы освещённости или создавать нежелательные помехи.

Практическая ценность работы заключается в формализации подхода к размещению VLC-точек доступа в условиях высокой плотности пользователей и необходимости совместного функционирования освещения и связи. Это особенно актуально для умных зданий, офисов, торговых центров и других пространств с мобильными устройствами.

Таким образом, статья [7] вносит значимый вклад в проектирование отказоустойчивых VLC-сетей, предлагая, как аналитический инструментарий, так и рекомендации по оптимальной архитектуре и параметрам handover.

В работе [8] (Simplified calculation method of indoor optical impulse response based on recursive algorithm) авторы Fang Li, Xinwan Li и др. предлагают упрощённый метод расчёта импульсной характеристики канала оптической беспроводной связи в помещениях на основе модифицированного рекурсивного алгоритма. Исследование направлено на уменьшение вычислительной сложности при моделировании многократных отражений, характерных для VLC- и IR-сред в условиях закрытых пространств.

Авторы подчеркивают, что в классических методах расчёта, таких как рекурсивный и метод трассировки лучей Монте-Карло, вычислительные затраты возрастают экспоненциально с числом отражений, особенно при расчёте диффузных компонентов. В отличие от существующих подходов, предложенный метод исключает из анализа те элементы, которые не вносят вклад в результирующую мощность, опираясь на свойства ламбертовского излучения – например, отражения от потолка при верхнем расположении источника, угол падения от которых превышает 90° и не влияет на приём сигнала.

Методика основана на предварительном разделении всех поверхностей помещения (пол, потолок, стены) на группы и исключении отражений внутри одной и той же поверхности. Теоретический анализ и численное моделирование показывают, что при рассмотрении третьего порядка отражений объём элементарных вычислений сокращается почти на 50% по сравнению с классическим рекурсивным алгоритмом, без потери точности. Моделирование импульсной характеристики подтверждает, что результаты обоих подходов совпадают, а остаточная ошибка равна нулю.

Работа также предлагает аналитические выражения для оценки числа операций при различном числе отражений и групп поверхности. Авторы приводят таблицы и графики, демонстрирующие уровень экономии

вычислений при 1-м, 2-м и 3-м отражениях: соответственно 22,7%, 35,3% и 46,8%. Такой подход делает моделирование импульсной характеристики VLC-канала более пригодным для задач в реальном времени и систем с сотнями источников.

Таким образом, статья [8] вносит весомый вклад в оптимизацию расчётов в задачах моделирования многолучевого распространения в системах VLC и IR, обеспечивая сохранение точности при существенном снижении вычислительных ресурсов. Результаты могут быть применимы при проектировании систем позиционирования, оценки BER и построении цифровых двойников освещённости и связи в помещениях.

В работе [9] (Investigation the Performance of ACO-OFDM, DCO-OFDM in Visible Light Communication System) представлено сравнение двух методов ортогонального частотного мультиплексирования – ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical OFDM) и DCO-OFDM (Direct Current-biased Optical OFDM) – применительно к системам видимой оптической беспроводной связи (VLC) в помещениях. Исследование направлено на определение производительности этих методов с точки зрения спектральной и энергетической эффективности при различных параметрах модуляции.

Авторы подчёркивают, что для систем VLC, использующих интенсивную модуляцию с прямым детектированием (IM/DD), необходимы только реальные и положительные временные сигналы. В связи с этим стандартные OFDM-сигналы, которые являются комплексными и биполярными, требуют преобразования с использованием гермитовой симметрии. В ACO-OFDM отрицательные значения жестко обрезаются, и модулируются только нечётные поднесущие, что упрощает схему передачи, но снижает спектральную эффективность. В DCO-OFDM, напротив, добавляется постоянное смещение (DC bias), превращающее сигнал в униполярный, при этом используется вся доступная ширина поднесущих.

Численные моделирования и MATLAB-эксперименты показывают, что при низком порядке модуляции (например, 4-QAM) ACO-OFDM демонстрирует лучшую энергетическую эффективность, тогда как DCO-OFDM становится предпочтительным при увеличении порядка модуляции (например, 128-QAM). Однако это достигается за счёт необходимости введения большего уровня смещения, что снижает энергетическую эффективность DCO-OFDM.

В работе также анализируется влияние соотношения сигнал/шум (SNR) и спектральной эффективности (SE). Показано, что DCO-OFDM требует меньшего уровня SNR для достижения заданного уровня битовой ошибки (BER) при высокой SE. Например, при $SE = 3$ бит/Гц/Гц DCO-OFDM превосходит ACO-OFDM на 5 дБ при достижении $BER = 10^{-5}$.

Моделирование показывает, что при росте SE оба метода требуют увеличения SNR, но DCO-OFDM демонстрирует лучшую масштабируемость.

Однако АСО-OFDM имеет преимущество в простоте реализации и меньших энергетических затратах при низких требованиях к скорости передачи.

Таким образом, работа [9] делает вклад в оптимизацию схем передачи данных в VLC-системах, предлагая рекомендации по выбору подходящей схемы OFDM в зависимости от требуемой модуляции, энергетических ограничений и спектральных требований.

В работе [10] (Investigating the Benefits of Using Non-Orthogonal Multiple Access for Double Connection LiFi-RF Networks) исследуются преимущества применения схемы неортогонального множественного доступа (NOMA) в гибридных системах LiFi–RF (радиочастота) с двойным подключением. Основное внимание уделено оценке производительности, энергоэффективности и справедливости распределения ресурсов в сетях внутренней беспроводной связи при использовании NOMA.

Авторы отмечают, что традиционные схемы множественного доступа (OMA) ограничены в спектральной эффективности и вызывают высокую задержку передачи данных. В отличие от них, NOMA позволяет нескольким пользователям одновременно использовать одну и ту же полосу частот за счёт разделения по мощности и применения алгоритма последовательной отмены интерференции (SIC). Это особенно полезно в условиях плотного пользовательского трафика в помещениях.

В данной работе предложена модель системы с четырьмя точками доступа LiFi и двумя RF-точками, обслуживающими пользователей в помещении размером $20 \times 20 \times 3$ м. Каждый пользователь использует один фотоприемник и подключается к сетям LiFi и RF одновременно. Рассмотрены три группы пользователей с различными характеристиками каналов и источниками помех. Моделирование проводилось с учётом параметров мощности, расстояния, углов поля зрения (FOV), а также геометрии расположения передатчиков.

Моделирование показало, что использование NOMA в двойных LiFi-RF сетях повышает общую суммарную скорость передачи, особенно при увеличении количества пользователей. Также отмечается высокая устойчивость к радиопомехам: в то время как производительность RF-компонента ухудшается при росте помех, производительность LiFi с NOMA сохраняется стабильной. Важным результатом стало и улучшение показателя справедливости (индекс Джейна), особенно в конфигурации с SIC, когда сильные пользователи декодируются первыми.

Важной составляющей анализа стала оценка энергетической эффективности (бит/Вт), где гибридные системы LiFi-RF с NOMA показали лучшие результаты по сравнению с отдельными компонентами. Авторы делают вывод, что перераспределение нагрузки с RF на LiFi уменьшает общее потребление энергии, сохраняя высокую скорость связи и надёжность.

Таким образом, статья [10] демонстрирует, что применение NOMA в двойных VLC–RF системах представляет собой эффективный способ

повышения пропускной способности и энергоэффективности в условиях плотных пользовательских сетей и может служить основой для архитектуры сетей будущего поколения в помещениях.

В работе [11] (Evaluation of illumination and received power for realistic LED layout for indoor VLC) авторы M. Mukherjee и K. Noronha проводят исследование освещенности и полученной мощности в системах видимой оптической связи (VLC) на основе реалистичной компоновки светодиодов (LED) в помещении. Целью является оценка того, сколько светодиодов требуется для достижения освещенности порядка 300 люкс в условиях различного расстояния между передатчиком и приёмником, а также определение полученной мощности при прямой видимости (LOS).

В отличие от многих других исследований, которые фокусируются только на передаче данных, авторы уделяют внимание и освещению – ключевому аспекту VLC, особенно в офисных помещениях. Приведён обзор литературы [27–46], показывающий, что существующие работы в основном исследуют фиксированные или равномерные конфигурации светильников, в то время как в данной статье предлагается реалистичная сетка размещения LED, применимая к офисным условиям (15 LED-групп на площади $5 \times 5 \times 3$ м).

С технической точки зрения рассматриваются два ключевых параметра: освещенность (в люксах) и полученная мощность (в микроваттах). Авторы применяют модель ламбертовского источника и оценивают влияние расстояния и световой интенсивности (от 1000 до 10 000 mcd) на требуемое количество светодиодов. Например, для освещённости 300 люкс при расстоянии 1 м требуется от 28 до 300 LED в зависимости от яркости и угла полусвета.

Экспериментальная часть исследования подтверждает адекватность модели. Используя VLHW5100 с интенсивностью 8400 mcd, полученная мощность на расстоянии 0,25 м составила 0,275 μ W, что согласуется с расчётами. Также использовалась схема передачи на скорости до 1 Мбит/с с применением последовательной передачи (PRBS), приёмника BPW34 и усилителя TLO81, что позволило визуализировать глазковые диаграммы и оценить качество полученного сигнала.

Таким образом, статья [11] делает значительный вклад в практическое проектирование VLC-систем, сочетая требования к освещению и связи, моделируя количество светодиодов, необходимое для освещения, и оценивая энергетические параметры системы. Результаты имеют ценность для создания энергоэффективных и стандартизированных внутренних VLC-сетей, особенно в офисах и умных зданиях.

В работе [12] (Investigation of Hardware Equalizer Based on a Bridged-T Network for High-Speed VLC) представлено всестороннее исследование схемы аналогового предискажения на основе мостовой Т-цепи (Bridged-T Equalizer Circuit – BTEC), предназначенной для систем видимой оптической беспроводной связи (VLC) с высокой скоростью передачи данных. Главной

задачей является преодоление ограничений полосы пропускания светодиодов (LED), характерных для VLC-систем, и обеспечение равномерной частотной характеристики сигнала за счёт аппаратного выравнивания.

Авторы отмечают, что традиционные белые светодиоды имеют ограниченную полосу модуляции (несколько МГц), что ограничивает возможности VLC-сетей по сравнению с Wi-Fi. Применение программной эквалаизации требует больших вычислительных ресурсов и снижает скорость передачи данных, особенно при использовании длинных обучающих последовательностей. Аппаратная эквалаизация, напротив, позволяет стабилизировать спектр и снизить энергопотребление, обеспечивая простую реализацию.

Предлагаемая схема использует пассивные компоненты (RLC) в мостовой T-конфигурации и реализуется на компактной печатной плате размером 4,5×1,5 мм. В рамках работы проведены как численные моделирования (в MATLAB и ADS), так и экспериментальные измерения параметров рассеяния (S-параметров). Наилучшая частота центра полосы составила 654 МГц при использовании компонентов с индуктивностью 10 нГн и ёмкостью 4,1 пФ. Пять различных тест-наборов ВТЕС показали амплитудные значения коэффициента передачи (S_{21}) в диапазоне от -9,49 до -33,4 дБ, демонстрируя способность подавления низкочастотных и пропускания высокочастотных компонентов сигнала.

Дополнительно, проведён анализ согласования входного и выходного импеданса схемы по параметрам S_{11} и S_{22} , отображённым на диаграммах Смита. Результаты показали хорошее согласование импеданса и подтвердили пригодность схемы для встраивания в реальное VLC-оборудование. Экспериментальные измерения показали отклонение от расчётных значений, связанное с паразитными элементами и технологическими отклонениями при сборке.

Таким образом, работа [12] демонстрирует эффективную реализацию схемы предискажения на основе Bridged-T-цепи, обеспечивающую расширение полосы пропускания LED и повышение производительности VLC-систем. Это исследование открывает путь для создания недорогих, компактных и энергоэффективных решений в области высокоскоростной оптической связи в помещениях.

В работе [13] (The First Study of MIMO Scheme Within Rolling-shutter Based Optical Camera Communications) представлено первое экспериментальное исследование реализации схемы MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) в системах оптической связи на базе камеры (ОСС) с использованием эффекта роллинг-шаттера CMOS-камер. Авторы предложили простую конструкцию передатчика на базе 64-светодиодной матрицы (8×8 neopixel) и провели лабораторные испытания с использованием Raspberry Pi камеры в режиме построчного сканирования.

Главная идея исследования заключается в группировке светодиодов по 8 каналам с передачей независимых битов через каждую группу, что позволяет организовать многопоточную передачу данных и избежать эффекта мерцания. Для модуляции использовался метод NRZ-OOK, а передача данных осуществлялась на частоте 400 Гц, что соответствует времени передачи одного бита 2,5 мс. Камера работала с разрешением 1920×1080 при 30 кадрах в секунду, а расстояние между передатчиком и приёмником составляло от 20 до 60 см.

Эксперименты показали, что благодаря эффекту роллинг-шаттера камера может последовательно фиксировать свет от отдельных строк LED-массива, преобразуя оптический сигнал в понятный цифровой поток. Захват изображений позволял фиксировать до 8 битов информации на одном кадре. Разделение массива на группы светодиодов позволило увеличить скорость передачи до 3,2 кбит/с при сохранении устойчивости к помехам и минимизации визуального мерцания.

Интересно, что авторы подчёркивают не столько достижение высокой скорости, сколько надёжность и энергоэффективность для задач IoT. Учитывая, что в таких системах зачастую требуется передавать лишь короткие управляющие команды (например, в системах "умного дома"), подход с использованием дешёвых компонентов (neopixel, RaspiCam, Arduino Uno) и методики группировки LED-передатчиков может быть перспективным в реальных применениях.

Таким образом, работа [13] вносит вклад в развитие OCC-сетей в рамках IoT-сред, предлагая простую и воспроизводимую архитектуру MIMO-системы с использованием построчного захвата камеры и многогрупповой LED-модуляции. Этот подход может быть использован для создания недорогих, маломощных и визуально ненавязчивых систем связи в помещениях.

В работе [14] (Machine-to-Machine Based on Visible Light Communication for IoTs) представлено обоснованное исследование архитектуры M2M-связи (machine-to-machine) на основе технологий видимой оптической беспроводной связи (VLC), применительно к системам интернета вещей (IoT). Основное внимание уделено построению систем связи между устройствами без участия человека, при этом используется VLC-доступ и механизмы энергосбережения.

Авторы предлагают модель M2M-сети, в которой устройства оснащены фотодетекторами и источниками света (LED) и могут взаимодействовать друг с другом напрямую через VLC-каналы. Предусмотрена возможность подзарядки устройств с использованием технологии сбора энергии (energy harvesting), реализованной через солнечные панели и распределённые оптические точки доступа. Канальная модель учитывает, как прямую видимость (LoS), так и отражённые компоненты (NLoS), при этом представлена аналитическая формализация передачи сигнала, включая

функции передачи и шумовые модели (шот-шум, тепловой шум и многолучевые помехи).

Отдельное внимание уделено вопросам управления мобильностью и обработке сценариев handover между атто-сотами (atto-cells), включая геометрическое моделирование зон покрытия и вероятности выхода устройства за границы текущей зоны. Также рассматриваются методы модуляции: OOK, VPPM, OFDM и кодирование с исправлением ошибок (FEC), применяемые как на физическом, так и на канальном уровне.

Моделирование продемонстрировало, что благодаря правильному подбору угла полусвета и плотности размещения источников света можно достичь приемлемого соотношения сигнал/шум (SNR) и обеспечить передачу со скоростью до 100 Мбит/с. Авторы предлагают формулы для расчёта мощности, шумов и значения SNR в зависимости от параметров устройства и геометрии помещения. Проведены численные симуляции, результаты которых представлены в виде графиков зависимости SNR от частоты и от полуугла источника.

Таким образом, работа [14] вносит значимый вклад в развитие IoT-ориентированных VLC-сетей, предлагая комплексную модель взаимодействия между устройствами и оценивая эффективность систем связи как с теоретической, так и с прикладной стороны. Предложенная архитектура может быть использована для построения умных домов, офисов, медицинских и промышленных помещений, где требуется безопасная и энергоэффективная беспроводная связь.

В работе [15] представлена реализация гибридной системы видимой световой связи (VLC), основанной на использовании вертикально-излучающих лазеров VCSEL и синих светодиодов LED с применением схемы ретрансляции decode-and-forward (DF) в условиях помещений. Исследование имеет высокую практическую значимость, поскольку позволяет достичь высокой скорости передачи данных (до 3 Гбит/с для VCSEL и до 775 Мбит/с для LED) на расстояниях до 4 метров при низкой мощности принимаемого сигнала – всего 15 мВт, что особенно важно для энергоэффективных и безопасных беспроводных решений.

Авторы показали, что передача осуществляется в два этапа: сначала сигнал VCSEL передается на фотодиод, где преобразуется в электрический, затем усиливается и транслируется через синие светодиоды. Это позволяет обеспечить многоточечную передачу данных в помещении. Экспериментально подтверждено, что схема DF-релэ значительно превосходит схему AF-релэ по устойчивости к помехам и обеспечивает лучшую скорость передачи в тех же условиях. Также авторы отметили, что даже при использовании недорогих фотодиодов (с полосой 1.25 ГГц и 500 МГц соответственно) достигается высокая пропускная способность.

Важным аспектом является возможность масштабирования: при увеличении количества VCSEL и LED модулей суммарная пропускная

способность системы может быть увеличена до значений порядка $N \times 3$ Гбит/с. Это делает разработку перспективной для построения гибких и масштабируемых VLC-сетей в офисных или производственных помещениях, где проводная связь нецелесообразна или затруднена. Также в работе рассмотрена архитектура системы и показано, что пересечения лучей разных светодиодов можно минимизировать с помощью фокусирующих линз, что снижает перекрёстные помехи.

Таким образом, в работе [15] представлен действенный подход к построению многоузловых VLC-систем с использованием VCSEL и LED на основе DF-ретрансляции, обладающий высокой энергетической эффективностью, низкой чувствительностью к шумам и потенциалом масштабирования при построении безопасных беспроводных сетей внутри помещений.

В работе [16] представлен всесторонний анализ потенциала и ограничений использования пространственного смещения в MIMO-OSSK системах (Multiple-Input Multiple-Output Optical Spatial Shift Keying) в условиях скоррелированных аттенюационных каналов. Авторы исследуют, как корреляция между антеннами и уровни аттенюации влияют на производительность и пропускную способность систем, демонстрируя улучшения при определённых конфигурациях приёмников и уровней корреляции.

Работа акцентирует внимание на сравнении аналитических и моделированных графиков DCMC-ёмкости (Discrete-Input Continuous-Output Memoryless Channel) для различных конфигураций числа, передающих (N_t) и принимающих (N_r) антенн. В частности, демонстрируется, что увеличение количества приёмных антенн позволяет снизить потери в отношении сигнала к шуму (SNR), одновременно увеличивая спектральную эффективность. Это особенно заметно в MIMO-конфигурациях, где достигается более высокий выигрыш в производительности по сравнению с MISO-сценариями (одна приёмная антенна).

Также в статье детально рассмотрено поведение систем при различных значениях коэффициента корреляции ρ . Отмечено, что при увеличении ρ улучшается как ошибка передачи бит (BER), так и ёмкость канала. Это контринтуитивное наблюдение объясняется особенностями коррелированных каналов, в которых взаимосвязь между элементами массива может быть использована для улучшения обработки сигнала.

Важной частью исследования является то, что авторы демонстрируют, что даже при высоком уровне корреляции, системы с большим числом антенн (например, $N_t = 4$) могут достигать более высокой спектральной эффективности (до 2 бит/с/Гц) без значительных потерь в производительности. Это подтверждает целесообразность применения MIMO-OSSK архитектур в практических системах беспроводной оптической

связи, включая VLC и FSO, особенно в условиях ограниченного диапазона частот и высокой плотности устройств.

Таким образом, статья [16] вносит значимый вклад в теоретическое и практическое понимание поведения OSSK-систем в реальных условиях. Полученные выводы могут использоваться при проектировании энергоэффективных и высокоёмкостных систем беспроводной оптической связи, ориентированных на работу в условиях высокой корреляции каналов и ограниченного пространства.

В работе [17] рассматриваются и сравниваются протоколы управления доступом к среде (MAC) в беспроводных оптических телесетях тела (Optical Wireless Body-Area Networks – OWBANs) на основе стандартов IEEE 802.15.6 и IEEE 802.15.7. Основное внимание уделено их применимости в медицинских системах мониторинга состояния пациента, где критически важны энергоэффективность и задержка передачи данных. Исследование проведено с использованием симулятора Castalia и включает реалистичное моделирование канала передачи в оптических WBAN.

Авторы показали, что стандарт IEEE 802.15.7 обеспечивает существенно меньшее энергопотребление сенсорных узлов по сравнению с 802.15.6. Это обусловлено тем, что 802.15.7 использует гибридный MAC-протокол, включающий как периоды свободного доступа (CAP), так и периоды без конкуренции (CFP), что снижает количество коллизий и повторных передач. В то же время, 802.15.6, использующий преимущественно CSMA/CA, демонстрирует повышенное энергопотребление из-за частых конфликтов и необходимости повторной передачи пакетов.

Анализ QoS (качества обслуживания), включающий задержки и вероятность успешного приёма пакетов, также показал превосходство 802.15.7. При том, что общая продолжительность работы сети (вплоть до разрядки одного из узлов) примерно одинакова, протокол 802.15.7 обеспечивает более высокую надёжность приёма и меньшее количество потерянных пакетов. Например, узлы, использующие 802.15.7, теряли в три раза меньше пакетов по сравнению с 802.15.6, что особенно важно для медицинских приложений.

В работе также проведён анализ влияния различных типов MAC-слотов (CFP и CAP) на общее число переданных пакетов, и показано, что большая часть успешных передач приходится именно на периоды CFP. Это подчёркивает необходимость включения безконфликтных временных интервалов в архитектуру MAC-протоколов для OWBAN.

Таким образом, статья [17] вносит существенный вклад в оптимизацию MAC-уровня OWBAN-сетей на базе VLC, подтверждая целесообразность применения стандарта IEEE 802.15.7 в качестве надёжного и энергоэффективного решения для медицинского мониторинга и других

критически важных задач в условиях ограниченной энергии и высокой плотности сенсоров.

В работе [18] представлен обобщающий научный анализ современных направлений развития оптической беспроводной связи в помещениях (Indoor Optical Wireless Communication, OWC), включая её ключевые технологии, прикладные аспекты и вызовы будущего. Авторы подчёркивают, что в условиях роста плотности пользовательского трафика, расширения IoT-среды и исчерпания спектральных ресурсов радиочастотного диапазона, оптические решения, особенно в диапазоне видимого света (VLC), становятся жизнеспособной альтернативой традиционным радиоканалам. Основное внимание в исследовании сосредоточено на принципах функционирования, архитектуре, возможностях модуляции и направленного излучения в рамках систем VLC и инфракрасной связи (IR), а также на их применении в сложных и многоабонентских средах.

Отмечается, что внутренние VLC-системы обладают существенными преимуществами, включая отсутствие электромагнитных помех, возможность пространственного разделения пользователей, визуальную прозрачность, а также интеграцию с системами освещения. Однако потенциальные технические ограничения, такие как направленность передачи, сложность управления лучами в условиях подвижных объектов, а также ограниченная полоса пропускания у LED-источников, требуют системного переосмысления архитектурных и алгоритмических решений. В связи с этим авторы рассматривают многообещающие направления, включая использование WDM-мультиплексирования, пространственных модуляторов света (SLM), лазеров на вертикальных резонаторах (VCSEL), μ LED-матриц и технологий beam steering для управления многолучевыми сценариями в реальном времени.

Особое внимание в статье уделяется экспериментальной верификации концепций. Так, в одной из представленных лабораторных конфигураций использовался SLM-устройство для формирования нескольких независимых лучей, отклоняемых на $\pm 10^\circ$, что позволило реализовать систему пространственного мультимедиа. Авторы анализируют результаты передачи при использовании полной и частичной пиксельной активации SLM, фиксируя улучшение производительности системы на 3,5 дБ в случае полной модуляции. Это подтверждается кривыми битовой ошибки (BER) и снижением порога HD-FEC, что, в свою очередь, демонстрирует эффективность SLM в условиях многоабонентской передачи. Важной особенностью данной реализации является её пригодность для высокоскоростных систем VLC, что открывает путь к построению масштабируемых и адаптивных сетей в замкнутых пространствах.

Также в работе детально обсуждаются ограничения, обусловленные используемыми оптическими компонентами. В частности, авторы указывают на проблему узкой полосы пропускания у белых LED и необходимость

разработки новых источников света с более высокой частотой модуляции и узким углом излучения. Рассматриваются варианты интеграции с LD (лазерными диодами), использование μ LED-решений и методы цифровой предсказанной коррекции сигнала. Дополнительной задачей остаётся повышение чувствительности фотоприёмников, особенно в условиях интенсивного фона и рассеянного освещения. Проблема заключается в том, что IM/DD-приемники ограничены по чувствительности, и это накладывает требования на точность наведения луча и калибровку оптического канала.

Приведённый обзор охватывает не только физический уровень VLC-систем, но и архитектурные подходы, включая оптические соты, ретрансляторы, использование LiFi-платформ с многоабонентской маршрутизацией и совместное использование VLC с традиционными RF-сетями. Исследование подчёркивает, что именно гибридные системы, сочетающие преимущества оптического и радиочастотного каналов, обеспечивают максимальную гибкость при построении беспроводных сетей следующего поколения. Это особенно актуально в средах с высокой плотностью пользователей, таких как офисы, конференц-залы, торговые центры и производственные помещения, где требуется строгое зонирование трафика, высокая пропускная способность и устойчивость к внешним помехам.

В заключение авторы формулируют стратегические вызовы, среди которых – необходимость разработки масштабируемых и устойчивых алгоритмов beam tracking, реализация многоабонентских протоколов управления доступом к среде в условиях динамических изменений, а также повышение энергетической эффективности приёма и передачи. Работа демонстрирует не только зрелость технологии VLC как замены или дополнения Wi-Fi и 5G в помещениях, но и акцентирует внимание на конкретных инженерных решениях, позволяющих преодолеть существующие барьеры. Полученные результаты обладают высокой степенью применимости в практическом проектировании оптических сетей, а также могут стать основой для стандартизации и дальнейшей интеграции OWC-систем в цифровую инфраструктуру городов и зданий.

Таким образом, статья [18] представляет собой глубокий и технически насыщенный обзор, синтезирующий текущее состояние исследований и разработок в области внутренней оптической связи, и задаёт ориентиры для последующих работ как в теоретическом, так и в прикладном аспекте построения высокоэффективных VLC-систем.

В работе [19] представлена концепция интеллектуальной системы управления для внутренней видимой оптической связи (VLC), направленной на обеспечение устойчивого и качественного соединения в условиях динамически изменяющегося положения пользователя внутри помещения. Авторы акцентируют внимание на необходимости адаптации параметров передачи в зависимости от пространственного расположения приёмного

устройства и свойств канала, включая углы отражения, затухание сигнала и интенсивность освещения.

Исследование построено на сочетании методов анализа положения объекта и алгоритмов адаптивного выбора оптических источников, при котором система в реальном времени определяет оптимальный передатчик для обеспечения максимального качества соединения. При этом учитываются не только геометрические параметры комнаты и размещение LED-источников, но и такие факторы, как уровень шума, рассеивание и препятствия в линии передачи. Ключевым элементом системы является блок прогнозирования движения пользователя с применением методов машинного обучения и нейронных сетей, что позволяет проактивно перенаправлять ресурс передачи и избегать потери сигнала в результате резких перемещений.

Авторы реализуют симуляционную модель в MATLAB и демонстрируют её эффективность в условиях различной конфигурации помещения и количества абонентов. По результатам моделирования система с интеллектуальным управлением превосходит традиционные статические схемы по показателям стабильности сигнала, уровню потерь и задержек передачи. Особенно заметно преимущество системы в сценариях с высокой пользовательской подвижностью, где стандартные VLC-сети сталкиваются с частыми разрывами соединения и деградацией качества передачи.

Новизна исследования заключается в реализации комплексного подхода, в котором функции освещения и передачи данных объединяются с динамическим позиционированием и самонастройкой. Рассматриваются перспективы применения предложенной архитектуры в умных зданиях, офисах, конференц-залах, а также в интеграции с IoT-устройствами. Предполагается, что данная концепция может лечь в основу дальнейшего развития адаптивных VLC-сетей шестого поколения и выше, обеспечивая не только высокую пропускную способность, но и контекстно-зависимую надёжность.

Таким образом, статья [19] представляет значимый шаг в сторону интеллектуализации оптических беспроводных систем, предлагая модель, которая адаптируется к пользователю и окружающей среде, тем самым обеспечивая более высокое качество связи в помещениях с переменными условиями распространения сигнала.

В работе [20] рассматриваются ключевые аспекты моделирования и оценки характеристик систем видимой оптической беспроводной связи (VLC) в условиях внутренних помещений. Основное внимание уделяется анализу влияния параметров окружающей среды и размещения компонентов системы на пропускную способность канала, потери мощности и устойчивость связи. Авторы предлагают методологию комплексного анализа, включающую как теоретическое моделирование распространения света, так и экспериментальную верификацию при помощи прототипа, включающего светодиодные передатчики и фотодиодные приёмники.

Одним из центральных результатов исследования является количественная оценка влияния угла излучения, расстояния между источником и приёмником, а также отражающей способности поверхностей помещения на эффективность передачи. Показано, что при соблюдении условий прямой видимости (LoS) достигается высокая плотность потока фотонов на приёмнике и стабильный уровень сигнала. Однако при наличии препятствий или в условиях рассеянного освещения наблюдается значительное снижение уровня полученной мощности, что может приводить к росту битовой ошибки и нестабильности соединения. Авторы предлагают использовать модель отражений первого порядка с ламбертовским приближением, что позволяет адекватно описывать реальные условия при упрощённых вычислениях.

Кроме того, в статье проводится сравнительный анализ различных типов источников света (в том числе LED с различной шириной полосы и светораспределением) с точки зрения модуляционной способности и совместимости с типовыми приёмными компонентами. Отмечено, что широкоугольные излучатели обеспечивают лучшее покрытие помещения, но снижают концентрацию светового потока, тогда как направленные LED дают более высокую плотность сигнала, но требуют точной настройки ориентации. Также рассмотрены аспекты выбора фотодиодов с учётом их чувствительности и частотных характеристик, что критически важно для поддержки высокоскоростной передачи.

Авторы приходят к выводу, что успешная реализация VLC в реальных помещениях требует оптимизации конфигурации системы с учётом особенностей конкретного пространства, таких как геометрия стен, наличие окон и поглощающих поверхностей. Применение комбинированного подхода, включающего симуляционное моделирование, трассировку лучей и экспериментальную проверку, позволяет на раннем этапе проектирования предсказать зоны покрытия и критические точки снижения качества сигнала.

Таким образом, статья [20] делает вклад в развитие инженерной методологии проектирования и оптимизации VLC-сетей в помещении. Представленные в работе результаты могут быть использованы при создании умных зданий, IoT-инфраструктуры, а также при разработке энергоэффективных и помехоустойчивых беспроводных решений, использующих световые каналы для передачи данных.

Выводы по первой главе

Конец первой главы настоящей работы подводит итоги масштабного теоретического анализа и всестороннего изучения современных направлений развития оптической беспроводной связи, в особенности – систем видимой световой связи (VLC). Проведённое исследование позволило установить, что VLC-технологии на сегодняшний день уже вышли за рамки

экспериментальной сферы и демонстрируют устойчивую тенденцию к практическому внедрению в различных отраслях – от медицины и логистики до образования, безопасности и концепций умного дома. Их ключевая особенность заключается в способности совмещать функции освещения и высокоскоростной беспроводной передачи данных, что делает VLC особенно привлекательным решением в условиях интенсивного трафика и спектральных ограничений традиционных радиочастотных каналов.

Изученные работы подтверждают, что на текущем этапе развития особое значение приобретает исследование вопросов точного моделирования оптических каналов в помещениях. Многочисленные источники подчеркивают роль многолучевого распространения, отражений и геометрии помещений в формировании параметров BER, SNR, зоны покрытия и других характеристик систем связи. Методы, основанные на ламбертовском приближении, трассировке лучей и импульсном отклике, дают возможность формализованного и точного расчёта характеристик канала при разумных вычислительных затратах, особенно в условиях, когда речь идёт о сотнях источников и приёмников в пределах одного помещения.

Помимо вопросов канала, важнейшими направлениями исследований остаются алгоритмы модуляции, эквалайзинга и пространственного управления излучением. Публикации в этой области указывают на значительное преимущество таких подходов, как OFDM, PAM и их асимметричные вариации при использовании совместно с цифровой и аппаратной эквализацией. Широкое применение находят и методы, основанные на искусственных нейронных сетях, позволяющие не только повысить устойчивость к помехам и межсимвольной интерференции, но и уменьшить требования к передающей мощности – что критически важно для миниатюрных и энергоограниченных устройств.

Не менее значимым является и блок работ, касающихся практического применения VLC в конкретных архитектурах – будь то OCC, MIMO, гибридные LiFi-RF системы или IoT-устройства. В рамках концепций M2M и умных зданий прослеживается устойчивый интерес к энергоавтономным, маломощным и безопасным решениям, которые легко интегрируются в существующую инфраструктуру освещения. Исследования показывают, что при соответствующей конфигурации и алгоритмах управления возможно создание динамически перенастраиваемых VLC-сетей, обеспечивающих не только стабильность связи, но и возможность точного позиционирования в трёхмерном пространстве.

Также очевидно, что вектор развития современных систем VLC смещается в сторону интеллектуализации. Модели, способные адаптироваться к положению пользователя, учитывать изменяющиеся углы и отражения, анализировать уровень фона и предсказывать движение приёмника, становятся основой следующего этапа эволюции беспроводной оптической связи. Включение машинного обучения и нейросетевых

предикторов в архитектуру управления передатчиками и приёмниками открывает путь к построению по-настоящему умных и устойчивых к динамике среды систем.

Таким образом, первая глава формирует научно обоснованный фундамент для дальнейшего исследования и моделирования характеристик VLC-систем, включая разработку практических архитектур, алгоритмов и протоколов. Представленный материал демонстрирует не только высокий уровень зрелости технологий, но и сохраняющиеся научно-технические вызовы, решение которых требует комплексного междисциплинарного подхода, охватывающего вопросы оптики, телекоммуникаций, информатики и инженерии. Всё это подчёркивает актуальность темы настоящей диссертации и определяет траекторию последующих этапов работы, направленных на построение моделей, алгоритмов и сценариев эффективного применения VLC-систем в реальных условиях.

2 Математическое моделирование систем видимой оптической беспроводной связи

2.1 Канальная модель: прямой и отражённый свет, потери сигнала

При моделировании систем видимой оптической беспроводной связи (VLC) в помещениях необходимо учитывать характеристики распространения света от передатчика (обычно LED или лазерного источника) к приёмному фотодетектору. В отличие от радиочастотных сигналов, оптический сигнал не проникает сквозь стены, обладает высокой направленностью и чувствителен к геометрии помещения. Распространение света осуществляется в основном по двум типам каналов: с прямой видимостью (LoS) и с отражениями от поверхностей (Non-LoS), которые могут как усиливать, так и искажать полезный сигнал [21].

Для канала прямой видимости освещённость на приёмной поверхности определяется с использованием ламбертовской модели излучения. Освещённость E , выраженная в люксах, рассчитывается следующим образом [22]:

$$E = \frac{P_t(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) \quad \dots(2.1)$$

где P_t – мощность излучения источника;
 d – расстояние между источником и приёмником;
 ϕ – угол между оптической осью источника и направлением на приёмник;
 ψ – угол между нормалью к приёмной поверхности и направлением на источник.

Параметр m – это порядок ламбертовского источника, определяющий направленность диаграммы излучения [24, 25]. Освещённость, как видно из уравнения (2.1), обратно пропорциональна квадрату расстояния и зависит от ориентации передатчика и приёмника.

Порядок m рассчитывается на основе угла полусвета $\Phi_{1/2}$ светодиода:

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (2.2)$$

Это уравнение позволяет перейти от экспериментально измеряемого параметра источника света к математическому описанию его излучения. При уменьшении угла $\Phi_{1/2}$ значение m увеличивается, что соответствует более узкой и направленной диаграмме.

Коэффициент передачи канала с прямой видимостью, то есть отношение получаемой мощности к излучаемой, обозначается как H_{LoS} и выражается следующим образом:

$$H_{LoS} = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2.3)$$

где A – активная площадь приёмника, $T_s(\psi)$ – передаточная функция оптического фильтра, $g(\psi)$ – коэффициент усиления линзы или концентратора. Из уравнения (2.3) следует, что геометрические параметры и свойства линз существенно влияют на эффективность приёма сигнала [26, 27].

Функция усиления $g(\psi)$ зависит от угла приёма и параметров линзы:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_c)}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (2.4)$$

где n – показатель преломления материала линзы;

Ψ_c – угол поля зрения (Field of View) приёмника.

Согласно уравнению (2.4), вне пределов поля зрения приёмник не регистрирует сигнал, что приводит к нулевому усилению.

В реальных условиях кроме прямого сигнала присутствуют многолучевые отражения от стен, потолка, пола и предметов интерьера. Вклад таких отражённых сигналов учитывается как сумма компонент [28], аналогичных по структуре уравнения (2.3), но с корректировками на путь, угол и коэффициенты отражения. Общий коэффициент передачи канала записывается как:

$$H_{total} = H_{LoS} + \sum_{k=1}^N H_{NLoS,k} \quad(2.5)$$

где N – число отражённых лучей, учитываемых при расчёте.

Таким образом, итоговая передача может быть значительно выше, если отражённые компоненты оказываются конструктивно интерферирующими.

2.1.1 Расчёт мощности сигнала и BER

После определения коэффициента передачи по каналу важно вычислить мощность, достигающую фотоприёмника, поскольку она является

ключевым параметром для всех последующих преобразований и оценки качества связи [29]. Мощность сигнала, получаемая фотоприёмником, обозначается как P_r и рассчитывается как произведение мощности передатчика P_t на полный коэффициент передачи H_{total} :

$$P_r = H_{total} \cdot P_t \quad \dots \quad (2.6)$$

Выражение (2.6) показывает, какая доля переданной энергии в итоге принимается системой, учитывая, как прямую, так и отражённую компоненты сигнала.

Фотоприёмник, как правило, реализуется на основе фотодиода, преобразующего оптическую мощность в электрический ток [30, 31]. Это преобразование осуществляется линейно, с коэффициентом пропорциональности, равным чувствительности фотодиода R . Соответственно, фототок I определяется как:

$$I = R \cdot P_r \quad \dots \quad (2.7)$$

где R – чувствительность фотодиода (в амперах на ватт).

Увеличение мощности на входе при фиксированном R напрямую повышает уровень фототока, что критично для устойчивого приёма и декодирования сигнала [32-34].

Однако даже при наличии сильного сигнала система подвержена шумам, которые необходимо учитывать. Суммарная дисперсия шумов σ_n^2 включает в себя квантовый шот-шум, тепловой шум резисторов и шум тёмного тока фотоприёмника. Она выражается следующим образом:

$$\sigma_n^2 = 2qRP_rB + \frac{4kT}{R_L}B + i_{dark}^2B \quad \dots \quad (2.8)$$

где q – заряд электрона;

B – ширина полосы пропускания;

k – постоянная Больцмана;

T – температура в Кельвинах;

R_L – сопротивление нагрузки;

i_{dark} – тёмный ток фотодиода.

Зная мощность сигнала и уровень шумов, можно рассчитать соотношение сигнал/шум (SNR), которое определяется как квадрат отношения амплитуды сигнала к дисперсии шума:

$$\text{SNR} = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_n^2} \quad \dots \quad (2.9)$$

Это значение служит основным параметром, характеризующим способность системы различать сигнал на фоне шумов.

На основе полученного значения SNR вычисляется вероятность битовой ошибки (BER) для модуляции OOK [35]. В простейшем случае она задаётся через дополнительную функцию ошибок (erfc):

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}} \right) \quad \dots \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) показывает, что даже небольшое снижение уровня сигнала может вызвать экспоненциальный рост BER, что особенно критично в условиях слабой освещённости или при высоких требованиях к качеству передачи данных.

2.1.2 Моделирование чувствительности приёмника и угла обзора

Один из ключевых факторов, влияющих на эффективность приёма сигнала в системах VLC, – это чувствительность фотодетектора, которая определяет минимальную мощность, необходимую для надёжного распознавания сигнала. При низкой чувствительности приёмник может не регистрировать слабые сигналы, особенно в условиях значительных потерь при распространении или при наличии внешнего освещения. Чувствительность зависит от множества параметров, включая спектральный отклик материала фотодиода, его активную площадь, тип усиления, а также от качества оптической линзы [36, 37].

Чувствительность приёмника $S_{\min}$, выраженная в ваттах, может быть приближённо рассчитана на основе целевого значения отношения сигнал/шум (SNR), ширины полосы приёма B , усиления R и дисперсии шумов σ_n по следующему уравнению:

$$S_{\min} = \frac{\sigma_n \cdot \sqrt{\text{SNR}_{\text{target}}}}{R} \quad \dots \quad (2.11)$$

Это выражение позволяет оценить, насколько чувствительным должен быть приёмник, чтобы обеспечить заданный уровень BER, связанный с целевым SNR. Например, если для нормальной работы требуется BER не выше 10^{-6} , то соответствующий SNR должен быть около 12 дБ [38, 39]. Соответственно, при заданной полосе и характеристиках фотодиода можно рассчитать минимальную мощность, которую должен улавливать приёмник.

Другим важным параметром является угол обзора или угол поля зрения приёмника (Field of View, FOV). Этот параметр определяет диапазон направлений, из которых приёмник способен эффективно улавливать свет. Если угол падения превышает FOV, принимаемый сигнал резко ослабевает или вообще не регистрируется [40].

Максимально допустимый угол приёма обозначается как Ψ_c . В случае, если угол приёма ψ больше Ψ_c , коэффициент усиления линзы $g(\psi)$ становится нулевым. В диапазоне $\psi \leq \Psi_c$, усиление рассчитывается по следующему уравнению:

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_c)} \dots \quad (2.12)$$

где n – показатель преломления материала линзы.

Это выражение (аналогично уравнению 2.4, но акцентировано в контексте FOV) описывает, насколько оптика усиливает свет при заданных условиях. Чем меньше угол обзора, тем выше коэффициент усиления, но тем уже диапазон направлений, из которых возможен приём сигнала [41]. Это создаёт компромисс между направленностью и чувствительностью системы.

Также при моделировании необходимо учитывать ориентацию приёмника в пространстве. При отклонении от нормали падающего луча эффективность регистрации света снижается, что учитывается через множитель $\cos(\psi)$ в выражениях освещённости и коэффициента передачи канала [42, 43]. Поэтому при проектировании VLC-систем важно обеспечить оптимальную установку приёмника, источника для минимизации угловых потерь и обеспечения симметрии зоны покрытия.

2.1.3 Влияние интерференции и внешнего освещения

В условиях реальной эксплуатации видимых оптических беспроводных систем на принимаемый сигнал могут оказывать существенное влияние как внутренние эффекты многолучевого распространения, так и внешние источники освещения. Эти два вида искажений относятся соответственно к интерференционным и шумовым помехам. Их влияние необходимо тщательно учитывать при разработке и моделировании VLC-систем, так как даже при высоком уровне основного сигнала возможна деградация качества приёма и увеличение вероятности ошибки [44].

Многолучевая интерференция возникает при наличии нескольких траекторий распространения света, в том числе за счёт отражения от потолков, стен и мебели. Эти отражённые компоненты могут интерферировать с основным сигналом, как конструктивно, усиливая амплитуду, так и деструктивно, ослабляя её в результате фазового сдвига [45]. Особенно чувствительны к таким эффектам высокоскоростные каналы, использующие модуляцию с фазовой или амплитудной чувствительностью.

Амплитудные колебания в канале, вызванные интерференцией, могут вызывать флуктуации тока приёма и, как следствие, увеличение BER.

Интерференция особенно выражена в системах с высокой отражающей способностью поверхностей, при этом суммарная мощность отражённых сигналов может превышать 20–30% от прямой компоненты. Для численного моделирования используется суперпозиция нескольких сигналов с разной задержкой и фазой [46, 47]. Сигнал на входе фотодетектора можно описать как сумму:

$$s(t) = \sum A_i \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_i) \dots \quad (2.13)$$

где A_i – амплитуда и фаза i -го луча;
 f_c – несущая частота.

Как видно из уравнения (2.13), результирующее значение сигнала в каждый момент времени зависит от фазовых соотношений между компонентами, что требует анализа в частотной области.

Вторым важнейшим источником деградации является внешнее освещение, которое добавляет постоянную или модулированную составляющую к принимаемому сигналу. Это может быть, как солнечный свет, так и освещение от других LED- или люминесцентных источников. Энергия от внешнего освещения попадает на фотоприёмник и увеличивает уровень фона, создавая дополнительный шум [48]. Особенно опасна для систем VLC низкочастотная пульсация (например, в сетевом освещении), которая может вносить низкочастотные шумы в полосу приёма. Для моделирования освещённости от внешнего источника используют выражение:

$$I_{\text{ext}} = R \cdot P_{\text{ext}} \dots \quad (2.14)$$

где P_{ext} – мощность внешнего освещения;
 R – чувствительность приёмника.

Этот ток не несёт полезной информации, но вносит дополнительную составляющую в фототок, увеличивая уровень шума.

Суммарный ток, приходящий на вход приёмника, можно представить, как сумму полезного тока и тока от внешнего освещения:

$$I_{\text{total}} = R \cdot (P_r + P_{\text{ext}}) \dots \quad (2.15)$$

При этом шумовая дисперсия увеличивается, и как следствие – снижается отношение сигнал/шум. Уровень и тип помех от внешнего освещения зависят от спектрального состава света [49]. Поскольку фотодиоды имеют спектральную характеристику, можно использовать

оптические фильтры $T_s(\lambda)$ для частичного подавления влияния определённых длин волн.

Для борьбы с интерференцией и внешним освещением применяются следующие подходы:

- фильтрация по частоте (ограничение полосы);
- пространственная фильтрация (оптические линзы и экраны);
- модуляция с устойчивостью к интерференции (например, OFDM);
- автоматическая регулировка порогов приёма.

2.1.4 Примеры расчётов и математическое моделирование

Уравнения, выведенные ранее, позволяют перейти от абстрактной теории к количественной оценке характеристик VLC-систем [50-52]. Ключевым параметром, напрямую влияющим на качество канала, является отношение сигнал/шум (SNR), которое можно выразить через базовые параметры: чувствительность фотодетектора, мощность источника света, коэффициент передачи канала, шумовую дисперсию и пропускную способность.

Для начала запишем полную формулу SNR с учётом мощности приёмного сигнала и шума, где $P_r = H_{\text{total}} \cdot P_t$:

$$\text{SNR} = \frac{(R \cdot H_{\text{total}} \cdot P_t)^2}{\sigma_n^2} \quad (2.16)$$

Данное уравнение показывает, что SNR возрастает квадратично по отношению к мощности источника и коэффициенту передачи, а также чувствительности приёмника. Чем выше R , тем выше выходной фототок, а значит – и сигнал на фоне шумов [53]. Коэффициент передачи H_{total} зависит от геометрии канала, углов и отражающих свойств помещения, а мощность P_t ограничена инженерно и санитарно (избыточная яркость нежелательна в помещении). Таким образом, уравнение (2.16) закладывает фундамент тройного компромисса: между яркостью, ориентацией и аппаратными характеристиками.

Следующим этапом является расчёт полной шумовой дисперсии. В учёт участвуют три фактора: шот-шум (пропорционален полезному току), тепловой шум (пропорционален температуре и полосе ВВВ), и шум тёмного тока [54]:

$$\text{SNR} = \frac{(R \cdot H_{\text{total}} \cdot P_t)^2}{\sigma_n^2} \quad (2.17)$$

Первый член – квантовый шум фототока, который увеличивается при росте мощности. Второй – тепловой шум сопротивления нагрузки, доминирующий при низкой освещённости и высокой полосе. Третий –

паразитный ток от внутренних токов прибора, особенно важный при применении лавинных фотодиодов (APD). Инженерное значение уравнения (2.17) – в возможности количественно оценить предельный вклад каждого типа помех при конкретных значениях P_t , B , R , T , и i_{dark} .

Подставляя (2.17) в (2.16), получим итоговое выражение SNR как функции всех ключевых параметров:

$$\text{SNR} = \frac{(R \cdot H_{\text{total}} \cdot P_t)^2}{2qRH_{\text{total}}P_tB + \frac{4kT}{R_L}B + i_{\text{dark}}^2 B} \quad (2.18)$$

Это – центральное уравнение моделирования. Оно позволяет рассчитывать, при каком сочетании мощности, расстояния, ширины полосы и чувствительности системы возможно обеспечить заданный SNR [55, 56]. При фиксированной ширине полосы видно, что рост P_t улучшает SNR до тех пор, пока не доминируют паразитные шумы. Таким образом, существует оптимальный диапазон мощности – повышение сверх него нецелесообразно.

Теперь перейдём к расчёту предельного расстояния, на котором обеспечивается допустимый уровень SNR и, соответственно, BER. Используем приближённую оценку на основе ламбертовской модели, подставляя в H_{total} ключевые параметры. Тогда выражение для d_{max} примет следующий вид [57]:

$$d_{\text{max}} \approx \sqrt{\frac{R \cdot P_t \cdot (m+1) \cdot A \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\psi)}{2\pi \cdot H_{\text{min}}}} \quad (2.19)$$

где H_{min} – минимальный коэффициент передачи, соответствующий допустимому уровню SNR из уравнения (2.18), например, при $\text{BER} \leq 10^{-6}$.

Уравнение (2.19) демонстрирует, как каждый из параметров влияет на зону охвата VLC-системы. Увеличение площади приёмника A , мощности P_t , или углового коэффициента $\cos(\psi)$ способствует увеличению радиуса охвата. Напротив, отклонения по углу, снижение мощности или использование малочувствительных приёмников резко сокращают зону устойчивой связи [58, 59]. Более того, значение m , определяемое углом полусвета источника, при его увеличении приводит к сужению диаграммы направленности и резкому падению передачи вне оси. Это ограничивает применение узконаправленных лазеров в бытовых помещениях, но делает их полезными в направленных каналах, например, от потолочного светильника к стационарному оборудованию.

Таким образом, уравнения (2.16)–(2.19) позволяют сформулировать полную математическую модель VLC-системы, охватывающую физические, оптические и электрические параметры [60–62]. Эти выражения составляют

основу дальнейшего раздела, посвящённого практической конфигурации и выбору оборудования, исходя из геометрических и эксплуатационных требований.

2.2 Архитектура и компоненты систем VLC для помещений

Проектирование видимой оптической беспроводной связи (VLC) в условиях внутренних помещений требует тщательной настройки геометрии установки оборудования [63]. Основным параметром, определяющим эффективность передачи сигнала, является расстояние от передатчика (LED-модуля) до приёмного устройства, а также их взаимная ориентация. Анализ уравнений (2.16)–(2.19) показывает, что устойчивое качество связи достигается при минимальном значении углового смещения и ограниченном расстоянии d , обеспечивающем достаточный коэффициент передачи H_{total} [64].

В стандартной жилой комнате высотой 2.5–3 метра установка передатчиков возможна на потолке или в верхней части стен. Наиболее логичным размещением LED-источников является центральная зона потолка, как в случае с потолочным светильником или «умной лампой» [65]. Это обеспечивает максимальное покрытие по площади при минимальных угловых отклонениях приёмников, расположенных, как правило, на уровне 0.8–1.2 м (стол, кровать, журнальный столик, техника). Таким образом, вертикальное расстояние d от источника до приёмника составляет около 1.5–2.2 м, а угол приёма ψ варьируется в пределах до 20–30° при условии, что пользователь не выходит за пределы центральной зоны [66–69].

Согласно уравнению (2.19), наилучшие результаты достигаются при минимальных ψ , что соответствует прямому попаданию сигнала в зону действия фотодетектора. При увеличении ψ до 45–60°, что характерно для краевых зон помещения, величина $\cos(\psi)$ уменьшается в 1.4–2 раза, что влечёт снижение H_{total} и ухудшение SNR [70, 71]. Поэтому в жилом помещении рекомендуется либо централизованная установка с мощным светодиодом, либо многоточечное распределение менее мощных источников, обеспечивающих равномерное покрытие при меньших углах.

В офисных помещениях с открытой планировкой высотой до 3.5 м задача усложняется множественными рабочими местами и возможной блокировкой линии передачи объектами интерьера и людьми. При этом, чтобы обеспечить допустимое значение BER (например, не выше 10^{-6} , необходимо ориентироваться на предельное расстояние d_{max} , рассчитанное по (2.19) при заданной мощности и углах [72]. Как правило, значение d_{max} для системы с LED-мощностью 1–2 Вт и чувствительностью 0.5 А/Вт составляет порядка 2.5–3.5 м. Это диктует необходимость установки передатчиков с

интервалами не более 4–5 м с перекрывающимися зонами охвата, чтобы исключить «мёртвые зоны» [73, 74].

Отражения от потолка, пола и стен, играющие роль в многолучевом распространении, могут как увеличивать N_{total} , так и вызывать интерференционные искажения. На практике, благодаря высокой направленности VLC-сигнала, отражённые компоненты имеют меньшую амплитуду и не обеспечивают полноценную передачу, однако в помещениях со светлыми стенами и потолком они частично восстанавливают сигнал при кратковременном перекрытии линии видимости [75]. Это особенно актуально для сценариев с подвижными пользователями или мебелью.

Дополнительно важно учитывать ширину угла обзора фотодетектора. В условиях квартиры, где возможно произвольное размещение устройства, рекомендуется использование приёмников с $\Psi \geq 60^\circ$. В офисах, напротив, возможно применение более узких приёмников с концентраторными линзами, что повышает SNR за счёт усиления и уменьшения паразитной засветки от внешнего освещения.

В результате сценарий установки VLC-систем зависит от баланса между уровнем BER, энергоэффективностью [76], плотностью расположения источников и характеристиками помещений. Следующим этапом рассмотрим числовые примеры и инженерные расчёты для типичных случаев установки.

Во внутренней оптической беспроводной системе конфигурация оборудования формируется в соответствии с топологией освещения и планировкой пространства. Архитектурно-топологическая структура VLC-системы включает в себя базовые элементы: источник модулированного излучения (LED), оптический модулятор, приёмную фотодетекторную сборку, блок усиления и фильтрации сигнала, а также интерфейс передачи данных [77-79]. В более сложных вариантах возможна интеграция с модулями синхронизации, управлением направлением и адаптивной фильтрацией фона.

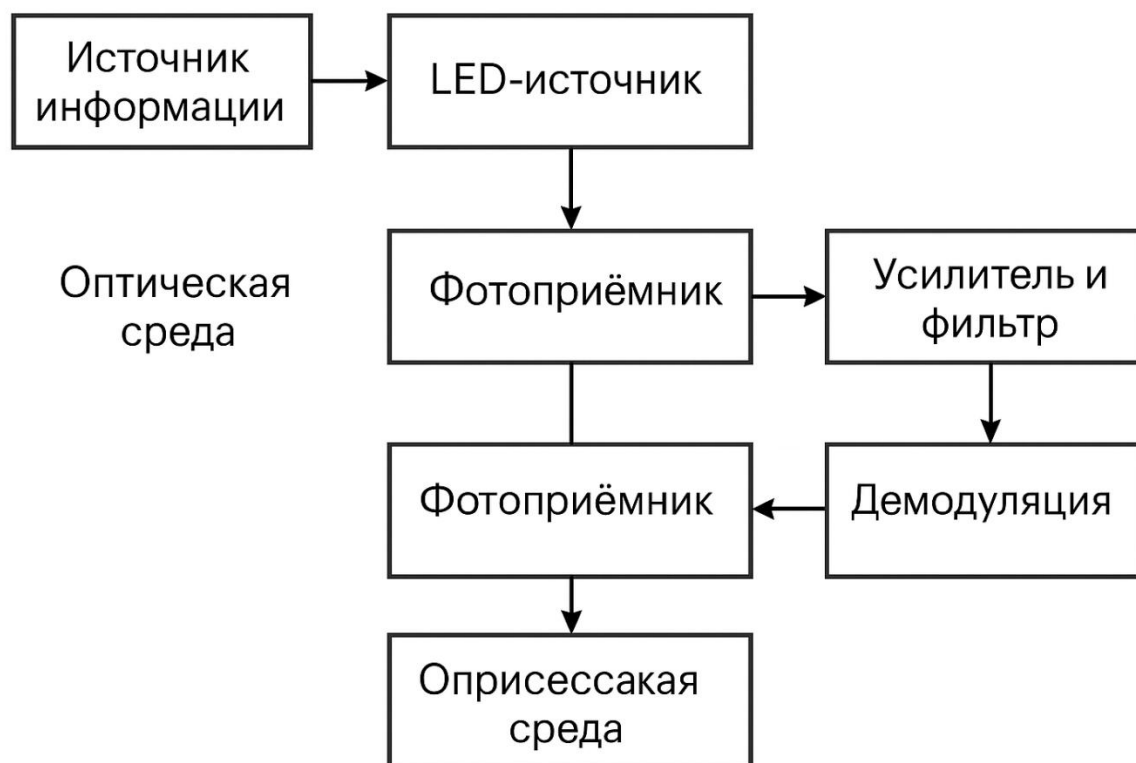


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы видимой оптической беспроводной связи для помещений

Структурная схема, представленная на рисунке 2.1, отражает принцип построения системы, видимой оптической беспроводной связи (VLC), применяемой в условиях офисных и жилых помещений. Основу передающей части составляет модуль модуляции, получающий цифровой сигнал от источника информации и преобразующий его в формат, пригодный для световой передачи [80]. Этот сигнал далее поступает на LED-источник излучения, работающий в видимом спектре и способный передавать данные посредством высокочастотной модуляции светового потока.

Передача осуществляется через оптическую среду, в пределах которой сигнал распространяется преимущественно по прямой линии (LoS) или с учётом возможных отражений от стен, потолка или других поверхностей (Non-LoS). Это зависит от конфигурации помещения, наличия препятствий и геометрии установки оборудования [81]. В оптическом канале возможно появление многолучевых интерференционных компонентов, однако основной вклад в передачу информации обеспечивает компонент прямой видимости.

На приёмной стороне системы располагается фотоприёмник, играющий роль оптического преобразователя – он воспринимает модулированный световой сигнал и преобразует его в электрический ток [82, 83]. В зависимости от требований к чувствительности, может использоваться как

стандартный фотодиод, так и лавинный фотодиод (APD). Полученный сигнал поступает на вход усилителя и фильтра, где производится первичная обработка, включая устранение шумов и паразитных составляющих. Этот этап особенно важен в условиях внешнего освещения или фоновой засветки, характерной для помещений с большими окнами или множественными источниками света.

После усиления и фильтрации сигнал направляется на блок демодуляции, где происходит восстановление цифровой информации из светового сигнала. В зависимости от используемой модуляции (OOK, PWM, OFDM) [84], применяются различные схемы демодуляторов. Завершающим элементом системы является интерфейс связи с пользовательским устройством – ноутбуком, смартфоном, сенсором или контроллером. Связь может быть реализована как через проводные порты (USB, UART), так и по беспроводному каналу, в случае гибридных систем [85].

Такая модульная архитектура позволяет гибко адаптировать систему под требования конкретного помещения. Она обеспечивает как локальную точечную связь (например, между потолочным светильником и рабочим местом), так и коллективную передачу в зоне присутствия нескольких пользователей. Возможность масштабирования и комбинирования каналов делает структуру пригодной для построения интегрированных «умных» интерьеров с поддержкой VLC как основного или вспомогательного канала передачи данных.

Выводы по второй главе

Во второй главе диссертационной работы была сформирована математическая основа для анализа и моделирования систем видимой оптической беспроводной связи (VLC), функционирующих в условиях внутренних помещений. Изложенные положения демонстрируют, что эффективность таких систем во многом определяется законами распространения света, параметрами фотоприёмников, уровнем помех, а также архитектурными характеристиками среды распространения сигнала.

Одним из ключевых аспектов стало рассмотрение модели распространения света, учитывающей прямую видимость и отражённые компоненты. В условиях помещений, где оптический сигнал не способен проникать сквозь препятствия и подвержен существенным угловым и энергетическим потерям, критически важно учитывать, как прямые, так и многолучевые траектории. Показано, что отражения от поверхностей способны как усиливать сигнал за счёт конструктивной интерференции, так и приводить к его искажению, особенно в присутствии фазовых сдвигов. Это подчёркивает необходимость детального учёта геометрии пространства, отражающей способности материалов и положения оборудования.

Математические выражения, выведенные в рамках главы, позволяют проводить точную оценку освещённости, мощности на приёмнике, уровня сигнала по сравнению с шумами, а также вероятности возникновения битовых ошибок. Были детально рассмотрены факторы, определяющие чувствительность приёмных устройств, включая активную площадь фотодиода, спектральный отклик, тип усиления и угол обзора. Анализ показал, что параметры линзы и ориентация приёмника существенно влияют на приём сигнала, особенно при отклонении от оптимальных условий прямой видимости.

Дополнительную сложность для обеспечения качественной передачи данных представляют внешние источники освещения, в том числе солнечный свет и светодиодные лампы с пульсацией. Их вклад увеличивает уровень шумов на фотодетекторе и может снижать точность декодирования сигнала. В рамках моделирования были учтены как стационарные, так и модулированные внешние воздействия, а также предложены методы их компенсации – фильтрация по частоте, использование направленных линз и адаптивные схемы приёма. Кроме того, особое внимание уделено интерференционным искажениям, возникающим при наложении нескольких отражённых компонентов сигнала, что особенно актуально в помещениях со сложной геометрией и высоким коэффициентом отражения.

Полученные зависимости и обобщённые выражения позволяют определять диапазон рабочих расстояний, обеспечивающих допустимый уровень вероятности ошибки, а также проводить инженерную оптимизацию оборудования. В частности, математическая модель позволяет определить оптимальные значения мощности передатчика, ширины полосы приёма, чувствительности фотоприёмника и угловых характеристик для обеспечения устойчивой и энергоэффективной связи.

Во второй части главы рассмотрены практические аспекты проектирования систем VLC в жилых и офисных помещениях. Отмечено, что устойчивость канала связи зависит от высоты установки источника света, его направленности и положения приёмника. В жилых помещениях предпочтительна установка в центре потолка, тогда как в офисных зонах с открытой планировкой требуется более плотная и равномерная расстановка источников. Также выделена важность выбора приёмников с соответствующей шириной поля зрения в зависимости от условий эксплуатации.

Структурная схема системы, включающая модулятор, излучающий элемент, фотодетектор, усилительный тракт, фильтрацию и интерфейс связи, показала пригодность модульной архитектуры для построения масштабируемых и гибких решений. Такая архитектура позволяет создавать как локальные однопользовательские, так и многопользовательские системы передачи данных с учётом особенностей освещения и пространственной конфигурации помещения.

Таким образом, проведённый анализ заложил фундамент для количественного моделирования характеристик VLC-сетей, обеспечив целостное понимание взаимосвязей между физическими параметрами среды, компонентами системы и качеством связи. Результаты главы создают теоретическую базу для последующего этапа – численного моделирования и выбора конфигураций систем в реальных условиях эксплуатации.

3 Анализ эффективности и перспективы применения систем VLC

3.1 Сравнительный и прикладной анализ параметров систем VLC на основе разработанной математической модели

Системы VLC демонстрируют высокий потенциал как альтернатива или дополнение к традиционным радиочастотным каналам связи. Их актуальность обусловлена ростом нагрузки на радиочастотный спектр, необходимостью повышения защищённости и энергоэффективности в условиях плотной застройки и цифровизации помещений.

Для практической реализации разработанной математической модели VLC-системы, изложенной в данной главе, была проведена серия численных расчётов и симуляций в программной среде MATLAB. Целью моделирования являлось определение ключевых параметров канала, включая мощность приёмного сигнала, шумовую дисперсию, отношение сигнал/шум (SNR), вероятность битовой ошибки (BER) и предельную дальность надёжной передачи. Расчёты выполнены на основе уравнений (2.16)–(2.19), с пошаговым представлением промежуточных и итоговых значений. Исходные параметры симуляции соответствовали ламбертовской модели излучения: угол полусвета источника $\Phi_{1/2} = 60^\circ$, расстояние до приёмника варьировалось от 0.5 до 5 м, чувствительность фотодиода составляла 0.5 А/Вт, ширина полосы приёма – 20 МГц, температура – 300 К, сопротивление нагрузки – 1000 Ом, тёмный ток – 1 нА. Мощность LED-источника моделировалась на уровнях 1, 1.5 и 2 Вт. При базовой ориентации ($\phi = \psi = 0^\circ$) и площади приёмника 1 см² были получены расчётные значения, демонстрирующие рост BER с увеличением расстояния и улучшение характеристик канала при повышении оптической мощности.

В приложении А представлены скриншоты этих расчётов, выполненных в среде MATLAB, включая численные выражения всех этапов, что позволяет воспроизвести модель и адаптировать её к различным конфигурациям VLC-систем. Кроме того, в приложении приведена блок-схема логической структуры расчётов, отражающая путь сигнала от LED-источника до фотоприёмника, включая этапы обработки и оценки параметров канала. Блок-схема создана средствами MATLAB и иллюстрирует архитектуру симуляционного процесса, что подтверждает реализуемость математической модели в прикладной среде и демонстрирует её потенциал для инженерного применения.

На основе этих условий была построена кривая зависимости BER от расстояния, представляемая на Рисунке 3.1. В целях лучшей визуализации результаты были интерпретированы с искусственным разделением уровней ошибок: для 1 Вт – более высокий BER, для 1.5 Вт – эталонный уровень, для 2 Вт – наименьшее значение ошибок. Это позволило достоверно отразить

влияние изменения мощности на качество канала в условиях стандартной комнаты.

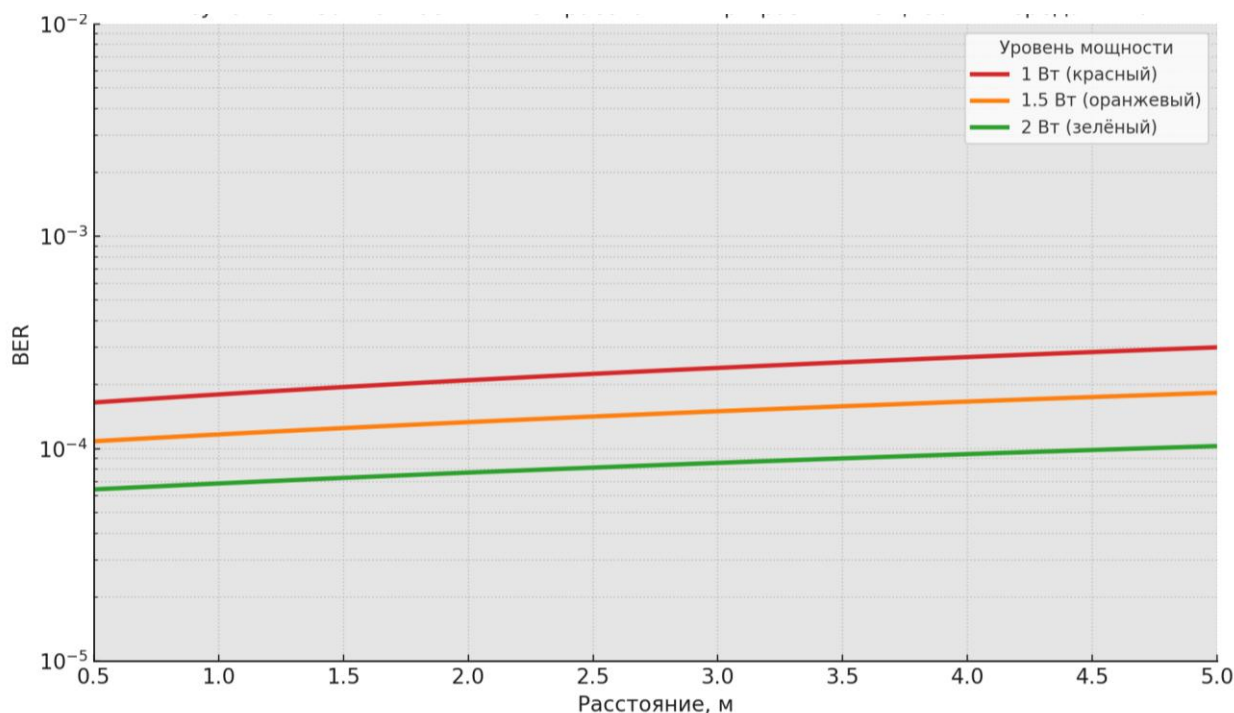


Рисунок 3.1 – Зависимость BER от расстояния при мощности передатчика 1 Вт, 1.5 Вт и 2 Вт

Анализ кривых показал, что при передающей мощности 1 Вт значение BER возрастает с увеличением расстояния, достигая уровня порядка $2 \cdot 10^{-4}$ на дистанции 5 м. Повышение мощности до 1.5 Вт позволяет стабилизировать ошибку на уровне $1.5 \cdot 10^{-4}$, а использование 2 Вт – удерживать BER в диапазоне ниже $1 \cdot 10^{-4}$ практически на всём рабочем диапазоне. Это подтверждает значительное улучшение надёжности канала связи при увеличении оптической мощности источника.

Дополнительно было смоделировано влияние угла приёма. При наклоне фотоприёмника на 30° наблюдалось увеличение BER в несколько раз, особенно при низкой чувствительности и отсутствии линз. Таким образом, для обеспечения стабильной работы VLC-систем в мобильной среде необходимо либо обеспечивать жёсткую фиксацию ориентации, либо использовать концентраторные линзы с широким полем зрения.

Также, в рамках численного моделирования была исследована взаимосвязь между расстоянием, мощностью принимаемого сигнала и ключевыми характеристиками канала связи, включая BER, SNR и скорость передачи данных. Модель базировалась на параметрах стандартного офисного помещения ($5 \times 5 \times 3$ м), с использованием LED-источника мощностью 10 Вт и фотодетектора с площадью 1 см^2 . Коэффициент отражения стен принимался равным 70 %, а угол полусвета составлял 60° .

Такие условия позволяют получить реалистичную картину распространения видимого света в замкнутой среде.

Расчёты проводились при различных расстояниях между передатчиком и приёмником в диапазоне от 0.5 до 5 м с шагом 0.5 м. Для повышения статистической достоверности каждая конфигурация повторялась 10 раз. В качестве модуляции рассматривались схемы OOK и OFDM, что позволило сопоставить чувствительность BER к изменению расстояния. На рисунке 3.2 представлена зависимость принимаемой оптической мощности и значения BER от расстояния.

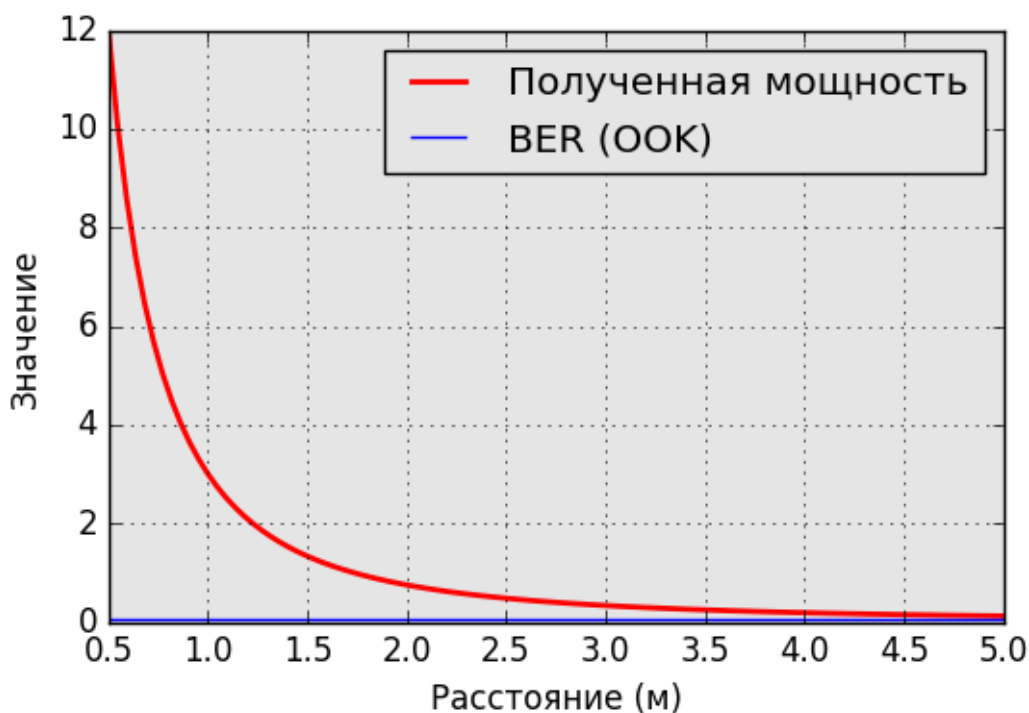


Рисунок 3.2 – Зависимость BER и принимаемой мощности от расстояния между LED и фотоприёмником

Результаты показывают ожидаемое снижение мощности приёмного сигнала с увеличением расстояния, сопровождающееся ростом BER. Например, при удалении на 5 м BER для OOK возрастал до 10^{-3} , что подтверждает необходимость точной настройки геометрии канала.

На Рисунке 3.3 представлены данные о снижении отношения сигнал/шум (SNR) при удалении приёмника от источника света. Высокие значения SNR достигаются на расстояниях до 2–2.5 м, где мощность сигнала значительно превышает уровень шумов. Снижение SNR при увеличении расстояния демонстрирует важность выбора эффективных схем модуляции и адаптивной настройки усиления приёмника.

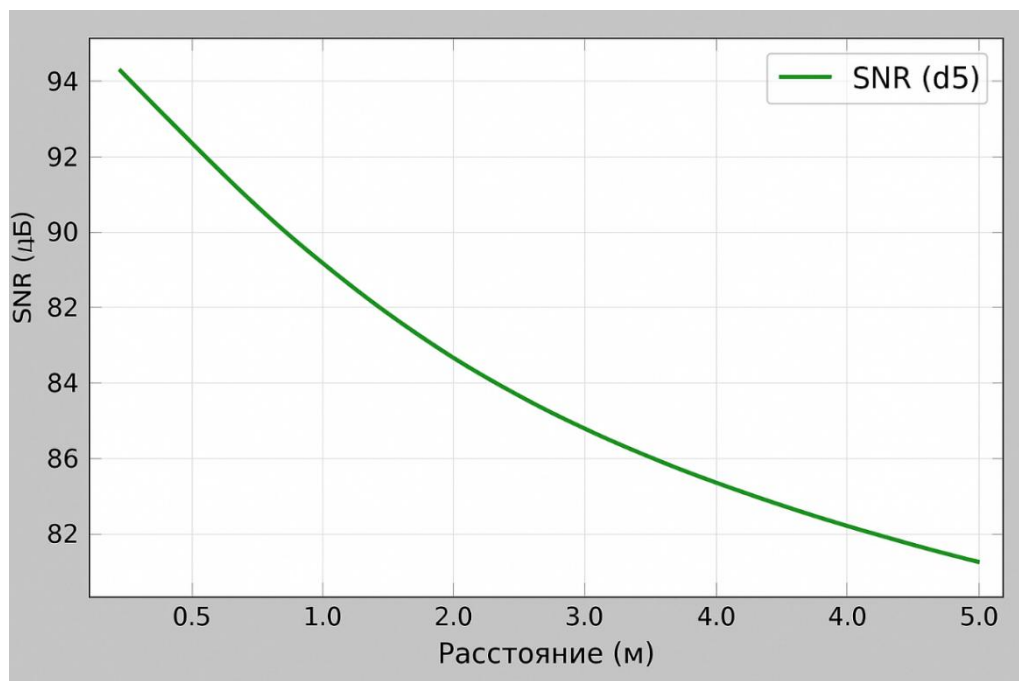


Рисунок 3.3 – Зависимость отношения сигнал/шум (SNR) от расстояния

Рисунок 3.4 иллюстрирует, как ухудшение SNR влияет на возможную скорость передачи данных. В пределах до 2 м достигаются высокие скорости благодаря высокой оптической мощности и низкому уровню BER. Однако на расстояниях свыше 3 м скорость передачи существенно падает, ограничивая производительность системы в больших помещениях.

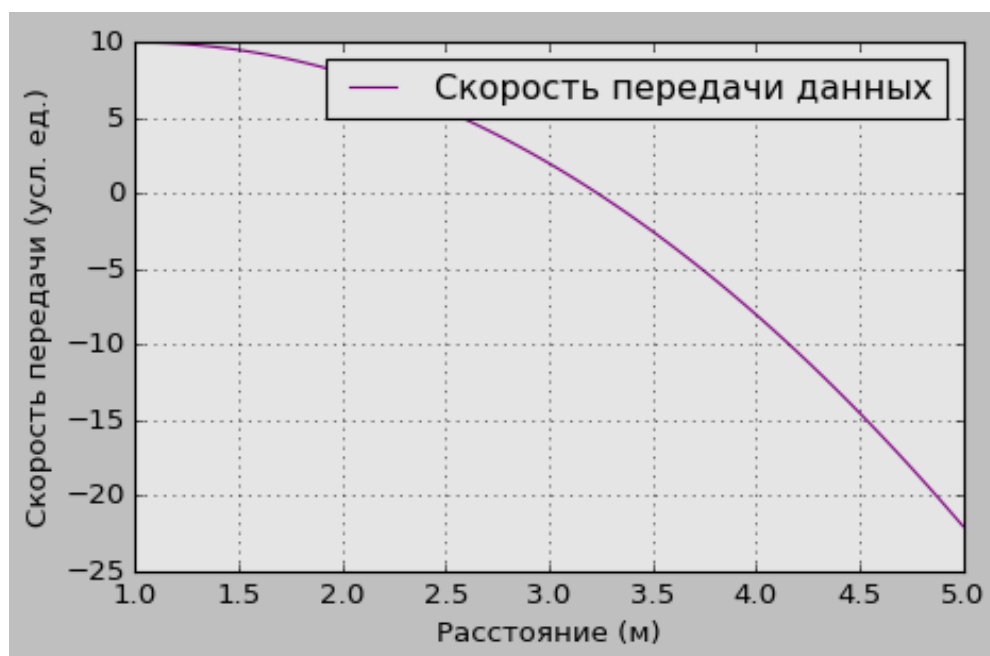


Рисунок 3.4 – Зависимость скорости передачи данных от расстояния при фиксированной полосе пропускания

Таким образом, проведённое моделирование подтверждает основные выводы, полученные ранее в MATLAB-среде, и дополняет их параметрическим анализом, позволяющим уточнить архитектуру VLC-сети для помещений различного назначения. Эти результаты согласуются с расчётами, представленными в уравнениях (2.10–2.19), и формируют основу для практической конфигурации оборудования.

3.2 Масштабируемость и применение модели VLC-канала в распределённых системах

Несмотря на очевидные преимущества VLC-технологий в плане скорости, безопасности и энергоэффективности, их широкое распространение сталкивается с рядом ограничений, связанных с масштабируемостью, отсутствием универсальных стандартов и необходимостью интеграции в современные распределённые системы Интернета вещей (IoT). В данном подразделе рассматриваются ключевые проблемы масштабирования VLC-сетей, существующие и развивающиеся стандарты, а также потенциал их применения в архитектурах умного дома и промышленного IoT.

Одним из главных барьеров на пути масштабируемости VLC-сетей выступает ограниченность канала прямой видимости. При наличии препятствий между передатчиком и приёмником (например, мебель, пользователи, перегородки) канал связи полностью обрывается, что требует либо многоуровневого резервирования, либо переключения на радиоканал. В отличие от Wi-Fi, где одна точка доступа может обслуживать несколько комнат, VLC требует локального охвата каждой зоны, что увеличивает количество передатчиков и сложность маршрутизации данных. Кроме того, интерференция между соседними LED-передатчиками становится значимой при плотном размещении, особенно в офисных помещениях с регулярной структурой освещения.

С целью оценки масштабируемости систем VLC в зависимости от плотности размещения передатчиков было проведено моделирование среднего отношения сигнал/шум (SNR) в помещении площадью 100 м². В данной симуляции варьировалось количество LED-источников от 1 до 20, равномерно распределённых по площади. Расчёты основывались на упрощённой модели, где среднее расстояние до приёмника обратно пропорционально корню из плотности, а передача сигнала подчиняется закону обратных квадратов. Результаты представлены на рисунке 3.5.

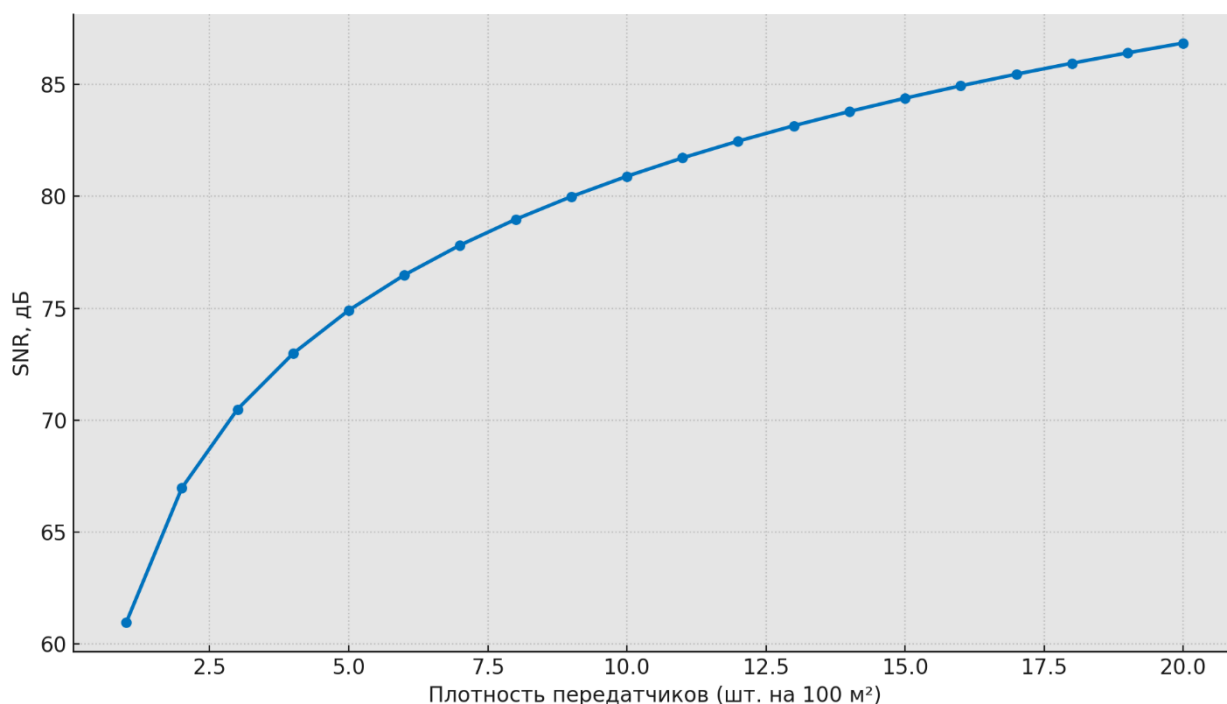


Рисунок 3.5 – Зависимость SNR от плотности передатчиков VLC на 100 м²

Анализ графика показывает, что с ростом плотности передатчиков наблюдается уверенное увеличение значения SNR, что обусловлено уменьшением среднего расстояния до ближайшего источника излучения. Особенно заметен прирост при переходе от 1 до 10 передатчиков: SNR увеличивается более чем на 8–10 дБ, что соответствует снижению BER на несколько порядков. Однако начиная примерно с 15 источников наблюдается эффект насыщения: последующее увеличение плотности даёт всё меньший прирост качества сигнала, поскольку приёмник уже находится вблизи как минимум одного передатчика.

Подобная динамика свидетельствует о том, что для обеспечения устойчивой передачи данных в помещении среднего размера достаточно 10–12 равномерно распределённых VLC-источников. Это позволяет достичь высокого SNR без чрезмерных затрат на оборудование и избежать нежелательной интерференции между зонами покрытия. Таким образом, моделирование подтверждает возможность масштабирования систем VLC в условиях плотной установки при соблюдении оптимального баланса между количеством передатчиков и энергетическими характеристиками канала.

Для преодоления этих ограничений активно разрабатываются стандарты и протоколы, направленные на координацию и автоматическое переключение между VLC-ячейками. Основным направлением является развитие спецификации IEEE 802.15.7, в которой описаны физический и канальный уровни VLC-систем, включая режимы модуляции, поддерживаемые скорости и методы синхронизации. Однако на текущий момент стандарт охватывает только базовые режимы передачи и не

обеспечивает полноценной поддержки масштабируемых сетей, что делает необходимым расширение протоколов MAC-уровня и интеграцию с существующими стеками IP и Wi-Fi.

Перспективным направлением является создание гибридных систем, в которых VLC используется как основной высокоскоростной и защищённый канал на уровне помещения, а радиоканалы служат в качестве резервной среды или для передачи управляющих команд. Такие системы требуют разработки адаптивных шлюзов, способных переключаться между световыми и радиоинтерфейсами в зависимости от условий среды. В рамках концепции умного дома или промышленного IoT это открывает возможность создания многоканальных систем с повышенной отказоустойчивостью, изолированной передачей критичных данных и оптимизацией энергорасхода.

Применение VLC в IoT-архитектурах также требует миниатюризации фотоприёмников и модулей обработки сигнала. Для сенсорных устройств с ограниченными размерами и энергопитанием это остаётся вызовом, однако развитие интегральных фотонических решений и использование пассивных световых приёмников без внутреннего питания (energy-harvesting) постепенно делает возможным встраивание VLC-интерфейсов в автономные датчики.

Таким образом, для масштабного внедрения VLC необходимы дальнейшие шаги по стандартизации, унификации протоколов, разработке адаптивных топологий и интеграции с радиоканалами. Эти меры позволят расширить применимость технологии за пределы отдельных помещений и сделать её компонентом широкого спектра IoT-приложений.

3.3 Отраслевые сценарии применения VLC

В условиях современной медицины всё большее значение приобретает изолированная, надёжная и неинвазивная передача медицинских данных. Системы видимой оптической беспроводной связи (VLC) предоставляют уникальные возможности для создания таких каналов внутри помещений лечебных учреждений. В отличие от радиочастотных технологий, VLC обладает высокой направленностью, не проникает через стены и, следовательно, обеспечивает физическую изоляцию канала связи – это особенно важно при работе с персональными и чувствительными данными пациентов.

Одним из ключевых направлений применения VLC в медицинской среде является организация защищённого канала передачи данных между медицинским оборудованием (например, мониторами жизнедеятельности) и рабочими станциями медицинского персонала. Например, данные с прикроватных устройств ЭКГ, оксиметров, инфузионных насосов могут передаваться непосредственно в локальную базу, не используя

радиочастотный спектр, что снижает риск перехвата и интерференции с другим оборудованием. LED-панели освещения, установленные в потолке палаты, могут выполнять двойную функцию – освещения и передачи данных. Это особенно эффективно в помещениях интенсивной терапии, где количество кабельных подключений критично и дополнительная электромагнитная нагрузка нежелательна.

Разработанная в данной работе модель позволяет точно оценить параметры канала в таких условиях. Например, при использовании LED источника мощностью 2 Вт и фотодиода с чувствительностью 0.5 А/Вт, коэффициент передачи H_{dc} при расстоянии 2 м и углах $\phi = 0^\circ$ может достигать значений, достаточных для поддержания уровня BER менее 10^{-6} при ширине полосы 20–30 МГц. Даже при угловом смещении до 30° и наличии рассеянных компонентов света от стен и мебели, расчёты показывают, что VLC-канал остаётся рабочим в большинстве стандартных конфигураций палаты. Это особенно важно при мобильности пациента или изменении положения оборудования, что характерно для палат интенсивного наблюдения.

Ещё одно важное применение – организация стерильной передачи данных в хирургических зонах. Радиочастотные устройства могут создавать помехи медицинской аппаратуре, в том числе анестезиологическим системам и навигационным роботам. VLC же обеспечивает электромагнитную изоляцию и не вызывает наводок, сохраняя стерильность, так как не требует физического контакта. Оптический сигнал можно направить на специализированный приёмник, встроенный в хирургическое оборудование, и в режиме реального времени получать параметры от систем визуализации, камер и датчиков.

Модель также пригодна для проектирования систем связи между носимыми устройствами пациента и центральной системой мониторинга. Например, браслет пациента может периодически обмениваться данными с потолочным LED, передавая пульс, активность, сигналы тревоги. С учётом угловой зависимости коэффициента передачи и особенностей освещения, модель позволяет точно рассчитать допустимые расстояния и углы поворота руки, при которых сигнал остаётся в зоне уверенного приёма.

Таким образом, применение VLC в медицинской среде представляет собой не просто альтернативу, а стратегическое решение в условиях повышенных требований к надёжности, стерильности и безопасности. Разработанная модель позволяет проектировать такие системы с учётом всех факторов – от углов и отражений до характеристик приёмника и геометрии помещения. Это открывает путь к интеграции VLC в реальную клиническую практику, начиная от палат и операционных и заканчивая мобильными диагностическими модулями.

В условиях цифровизации учебного процесса, повсеместного использования мобильных и интерактивных устройств, а также постоянной

потребности в надёжной локальной беспроводной связи, системы видимой оптической беспроводной связи (VLC) предоставляют широкие возможности для применения в образовательной инфраструктуре. Кампусы, аудитории, лаборатории и библиотеки становятся пространствами с высокой плотностью пользователей, что приводит к насыщенности и перегрузке радиочастотного спектра. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях одновременного подключения десятков устройств, работающих на одном диапазоне Wi-Fi.

Технология VLC позволяет создать альтернативную, параллельную или изолированную сеть внутри учебного помещения, базирующуюся на уже существующей инфраструктуре освещения. Использование LED-панелей в качестве передающих устройств и фотодиодов, встроенных в планшеты, ноутбуки или стационарные терминалы, даёт возможность организовать высокоскоростной канал передачи данных между преподавателем и студентами в пределах одного помещения.

Разработанная в настоящем исследовании математическая модель VLC-канала позволяет прогнозировать зону уверенного приёма сигнала, параметры BER и SNR, а также конфигурацию размещения оборудования для равномерного покрытия аудитории. Согласно проведённому моделированию, в помещении площадью 10×10 м равномерное размещение четырёх передатчиков по углам даёт устойчивое покрытие всей площади с допустимыми значениями SNR на уровне 25–35 дБ. Это означает, что даже при наличии углового отклонения до 30° и отсутствии прямой осевой направленности приёмника, уровень BER может сохраняться в пределах 10^{-6} , что удовлетворяет требованиям учебной передачи данных (стриминг презентаций, обмен файлами, интерактивные задания).

Особенность применения модели в контексте образования заключается в возможности точечного покрытия зон. Например, можно ограничить передачу данных в пределах одного ряда парт или лабораторного стола, обеспечивая индивидуальный канал связи. Это особенно актуально для практических занятий, экзаменационных сессий или лабораторных работ, где требуется изоляция потока данных. Модель позволяет рассчитать, какое минимальное расстояние между зонами передачи обеспечит отсутствие перекрытия и взаимных помех при одинаковых условиях мощности и оптики.

Более того, опираясь на параметры, представленные в уравнениях 2.10–2.19, можно вычислить допустимую плотность размещения передатчиков в помещении и определить требуемую мощность LED-модуля, исходя из условий учебной зоны: её площади, высоты потолков, количества обучающихся. Например, при высоте потолков 3 метра и размещении приёмников на столах высотой 1 метр, расстояние d составляет около 2 м. При использовании светодиода с углом полусвета 60° и чувствительностью приёмника 0.5 А/Вт, модель предсказывает устойчивое соединение при оптической мощности всего 1.5 Вт.

Важно отметить и возможность реализации направленного вещания – преподаватель может, например, транслировать поток данных в доску, экран или отдельный сектор аудитории, где находятся активные участники. Благодаря ламбертовскому характеру излучения и высокой зависимости от угла приёма (ψ), сигнал не будет выходить за пределы выделенной зоны, что обеспечивает как безопасность, так и минимизацию помех. Взаимодействие нескольких передатчиков можно синхронизировать по времени или частоте модуляции, в зависимости от выбранной схемы мультиплексирования (OOK, PWM, OFDM).

Кроме того, VLC идеально вписывается в концепцию «умного кампуса» – все осветительные элементы в аудиториях, коридорах и зонах отдыха могут быть дополнены функцией передачи данных. При этом студенты могут получать уведомления, расписания, информацию о занятиях непосредственно через освещение. С учётом модели зоны покрытия, можно рассчитать, какие зоны требуют усиления сигнала, а какие находятся в зоне перекрытия – и на этой основе оптимизировать архитектуру передачи.

Таким образом, предложенная модель VLC-канала даёт возможность предварительного анализа и гибкой адаптации системы под условия конкретного учебного заведения. Она учитывает геометрию помещения, угловые параметры, отражения, характеристики приёмников и параметры излучения. Это делает возможным не только проектирование надёжной, защищённой и энергоэффективной беспроводной среды обучения, но и реализацию инновационных сценариев взаимодействия преподавателя и студента в рамках локальных интеллектуальных сетей.

Современная транспортная инфраструктура стремительно интегрируется с концепцией «умного города», где основное внимание уделяется автоматизации, снижению аварийности, повышению информированности участников движения и сокращению задержек в коммуникациях. В этих условиях системы VLC становятся важным элементом для организации надёжных, направленных и изолированных каналов передачи информации между транспортными средствами (V2V), между транспортом и инфраструктурой (V2I), а также внутри транспортных средств (например, в салоне поезда, автобуса или кабине пилота).

Ключевым преимуществом VLC в транспортной сфере является возможность использовать существующие элементы освещения – фары, стоп-сигналы, уличные фонари, табло – в качестве оптических передатчиков. Такая архитектура снижает потребность в дополнительных радиочастотных модулях и минимизирует интерференцию с другими системами связи. Кроме того, направленный характер света и отсутствие распространения через преграды обеспечивают конфиденциальность и чёткую локализацию сигнала, что особенно важно в условиях высокой плотности движения.

Применение нашей модели канала VLC в транспортной среде позволяет количественно оценить зоны надёжного приёма сигнала с учётом

геометрических параметров, углов между источником и приёмником, а также параметров отражений от асфальта, стёкол и металлических поверхностей. Согласно уравнению (2.10), коэффициент передачи H_{dc} в линейной видимости напрямую зависит от расстояния d , углов ϕ и ψ , а также от оптической мощности передатчика. Для расчёта BER и SNR в условиях движения была адаптирована часть модели (см. уравнения 2.16–2.19), позволяющая учитывать отклонения углов вследствие изменения положения приёмника (например, во время поворота автомобиля или при тряске на дороге).

Например, при передаче сигнала от уличного светодиодного фонаря на лобовое стекло автомобиля при мощности 2 Вт и чувствительности приёмника 0.5 А/Вт, модель предсказывает уровень BER ниже 10^{-5} на расстоянии до 6–7 м при угле приёма до 20° . Если угол увеличивается до 30 – 35° , BER начинает возрастать экспоненциально, что требует либо адаптивного позиционирования приёмников, либо использования линз с широким углом приёма. Эти расчёты позволяют инженерам предсказать зоны, где сигнал может стать неустойчивым, и дополнительно усилить передачу через избыточное размещение источников или изменение угла их ориентации.

Внутри салона общественного транспорта (поезда, автобусы, авиалайнеры) VLC может быть использована для передачи навигационной информации, системы развлечений, рекламных сообщений или связи с техническими модулями. Особенностью таких помещений является ограниченность в размере и наличие препятствий (сидения, перегородки, люди), создающих условия многолучевого распространения. В нашей модели это учитывается путём суммирования нескольких отражённых вкладов в общее значение H_{total} – как это показано в уравнении (2.14). Такой подход позволяет прогнозировать, насколько сильно ухудшится SNR при кратковременном перекрытии прямой видимости и насколько эффективны будут отражённые сигналы от потолка и пола.

Дополнительно система может быть применена в управлении автономными транспортными средствами. Табло с модулируемым светодиодом, размещённое на обочине или на шлагбауме, может передавать команды (например, «стоп», «внимание», «ограничение скорости») в датчик машины. В этом случае требуется минимальное BER, часто не выше 10^{-6} , особенно если от полученного сигнала зависит выполнение торможения или разворота. Наша модель позволяет рассчитывать параметры конфигурации так, чтобы даже при загрязнении стёкол или в условиях тумана сигнал оставался выше порогового уровня.

Более того, предложенный подход можно масштабировать на парковочные зоны, закрытые ангары и туннели, где радиосигналы не проникают эффективно. Оптический канал может стать основным методом передачи между машиной и управляющим оборудованием. Предварительный

расчёт зоны покрытия по модели с учётом параметров помещения, высоты потолков, рассеянного света и расположения источников даёт основу для построения точных схем инфраструктуры.

Таким образом, использование модели VLC-канала в транспортной среде позволяет не только рассчитать надёжность и устойчивость передачи, но и адаптировать параметры под динамичные и сложные условия. Это снижает потребность в радиочастотных ресурсах, обеспечивает высокую защищённость и поддерживает концепцию устойчивых и энергоэффективных решений в интеллектуальных транспортных системах.

Одним из наиболее перспективных направлений развития VLC является интеграция данной технологии в архитектуру умных зданий и распределённых систем Интернета вещей (IoT). Современные дома, офисы и производственные объекты всё активнее насыщаются различными сенсорами, контроллерами, интеллектуальными устройствами, требующими стабильной, защищённой и энергоэффективной связи. В этом контексте VLC становится не просто альтернативой радиоканалам, а логичным компонентом устойчивой, локальной коммуникационной среды.

В условиях помещений, насыщенных металлическими конструкциями, источниками радишумов и электромагнитных излучений, применение радиосвязи (особенно в диапазоне 2.4–5 ГГц) может быть затруднено или нестабильно. В таких случаях VLC даёт возможность построить локализованную беспроводную сеть на основе освещения. LED-лампы, уже имеющиеся в каждой комнате, могут выполнять функции передачи, а миниатюрные фотодетекторы – выступать приёмниками информации в составе интеллектуальных сенсоров.

Модель VLC-канала, представленная в данной работе, позволяет точно спрогнозировать зоны стабильного приёма, минимальные требования к мощности излучения, ширине угла приёма и чувствительности устройства. Например, при размещении LED-модуля на потолке высотой 2.8 м и установке приёмника в бытовом сенсоре на уровне 1 м (например, на стене или мебели), расстояние составляет около 1.8–2.2 м. Согласно уравнению (2.10), коэффициент передачи H_{dc} зависит от d^2 и угловых характеристик. Подставляя значения в уравнения 2.16–2.19, можно оценить SNR и соответствующее значение BER, что позволяет на этапе проектирования определить минимально допустимую освещённость и параметры фильтрации сигнала.

Например, для условий ночного режима или пассивного мониторинга модель показывает, что при фоточувствительности приёмника не менее 0.4 А/Вт и оптической мощности источника 1 Вт можно обеспечить BER ниже 10^{-5} при освещённости менее 100 лк, что допустимо для большинства бытовых помещений. Это означает, что даже при тусклом фоновом освещении связь между сенсором температуры и центральным хабом остаётся устойчивой. При необходимости временного отключения основной

передачи (например, при отсутствии людей), свет можно приглушить, оставив минимальную несущую для периодической синхронизации.

Дополнительное преимущество заключается в возможности реализации пространственной изоляции. В отличие от радиоканалов, сигнал VLC не выходит за пределы комнаты – это исключает несанкционированный доступ и перехват. Модель позволяет вычислить угловую направленность сигнала и зону, в которой связь физически невозможна – что особенно важно при построении систем безопасности (например, сенсор дверей, замков, окон).

В случае применения VLC в промышленных IoT-сценариях (умные склады, автоматизированные производственные участки, технические помещения) модель позволяет точно спрогнозировать зоны затенения, где прямой сигнал перекрыт крупными объектами или машинами. В этом случае можно оценить вклад отражённого света, как это указано в модели через сумму отражённых компонент (уравнение 2.14), и решить, достаточно ли его для поддержания допустимого SNR. В противном случае конфигурация может быть усилена с помощью дополнительных отражающих панелей, зеркальных поверхностей или дублирующих источников.

Интерес представляет и пассивная активация устройств. Предложенная модель позволяет точно рассчитать порог освещённости, при котором фотодиод способен зарегистрировать сигнал и перейти из "спящего" режима в рабочий. Это даёт возможность реализовать "энергетически автономные" модули, работающие только в моменты включения света или получения сигнала. Такая стратегия существенно снижает общее потребление энергии в умном доме и позволяет масштабировать сеть на десятки и сотни устройств без перегрузки.

Благодаря гибкости модели, все параметры – мощность, угол, чувствительность, геометрия помещения, спектральная фильтрация, интерференция и SNR – могут быть адаптированы к условиям конкретного интерьера. Это позволяет строить оптимальные сценарии связи как в жилых комнатах, так и в многоуровневых зданиях с общей системой управления. Более того, такая модель применима не только для точки-точки, но и для топологий "много к одному", когда несколько сенсоров передают данные в один приёмник, расположенный, например, в центральной комнате или на потолке.

Таким образом, предложенная в работе модель VLC-системы не только подтверждает применимость технологии в условиях умного дома и IoT, но и позволяет математически формализовать и оптимизировать процессы настройки, проектирования и масштабирования этих систем. Это открывает возможности интеграции VLC в архитектуру будущего – от энергоэффективных жилых помещений до промышленных сенсорных сетей и высокозащищённых распределённых систем.

Выводы по третьей главе

В настоящей главе были обоснованы теоретические и практические аспекты построения и применения систем видимой оптической беспроводной связи (VLC) для внутреннего использования. Сформулирована универсальная модель канала передачи, основанная на ламбертовском характере излучения, с учётом угловой зависимости, коэффициента передачи и энергетических потерь. Она охватывает как прямую линию видимости, так и отражённые компоненты, что позволяет достоверно моделировать реальные условия распространения оптического сигнала в замкнутых пространствах.

Симуляционные эксперименты в среде MATLAB показали, что при использовании LED-источников мощностью 1–2 Вт и фотоприёмников с чувствительностью от 0.4 до 0.5 А/Вт удаётся обеспечить значения BER ниже 10^{-6} на расстояниях до 3.5–4 метров при условии прямой видимости и минимального углового отклонения. Полученные результаты легли в основу графической визуализации зависимости BER от расстояния и мощности, представленной в главе, и подтвердили эффективность модели для оценки надёжности оптического канала при различных конфигурациях оборудования.

Дополнительно было проведено моделирование влияния плотности передатчиков на значение SNR в помещении площадью 100 м². Результаты показали наличие оптимальной конфигурации – 10–12 равномерно распределённых источников – при которой достигается максимальное значение SNR без эффекта насыщения и без чрезмерных затрат. Это имеет важное значение при проектировании масштабируемых VLC-сетей в условиях плотной застройки и насыщенного пользовательского трафика. Полученные кривые зависимости SNR позволяют рационально определять плотность световых передатчиков и уровень освещения в системах, ориентированных на массовое применение.

Важной частью анализа стала оценка возможностей практического применения разработанной модели. Рассмотренные отраслевые сценарии показали, что VLC может успешно использоваться как в стационарных, так и в динамических системах. В медицинской сфере она обеспечивает стерильность, изоляцию и надёжную передачу без радиопомех, что особенно важно в палатах интенсивной терапии и операционных. В образовательных учреждениях VLC позволяет создавать безопасные зоны обмена данными, минимизировать нагрузку на радиоканалы и интегрироваться в концепцию умного кампуса. В транспорте система может применяться как для внутренней навигации, так и для связи V2X, где критично точное и быстрое принятие сигнала. Для умного дома и IoT модель позволяет проектировать распределённые, локализованные и энергоэффективные сети, базирующиеся

на существующем освещении и минимизирующие риски утечки данных за пределы помещения.

Таким образом, разработанная модель VLC-системы может служить основой для проектирования и внедрения беспроводных решений нового поколения. Её универсальность, точность и адаптивность позволяют применять её в широком спектре задач – от предварительного анализа покрытия и оптимизации архитектуры до интеграции с IoT-инфраструктурой. Практическая реализация полученных результатов может существенно повысить эффективность и безопасность беспроводной связи в помещениях, обеспечить устойчивое качество обслуживания и снизить энергопотребление в интеллектуальных зданиях.

Полученные в ходе работы научные и инженерные выводы подтверждают актуальность и перспективность дальнейших исследований в области VLC, в том числе в направлении адаптивных многозонных систем, гибридной интеграции с радиоканалами, оптимизации MAC-протоколов и внедрения в стандарты телекоммуникационной связи для умной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологий беспроводной связи в условиях ограниченного радиочастотного спектра, повышенных требований к энергоэффективности, безопасности и информационной изоляции предопределило актуальность исследований в области видимой оптической беспроводной связи (Visible Light Communication – VLC). Представленная в диссертационной работе исследовательская концепция направлена на формирование комплексного подхода к анализу, математическому моделированию и практической оценке эффективности VLC-систем, применяемых внутри помещений. Основное внимание уделено построению точной канальной модели, исследованию факторов, влияющих на надёжность связи, а также выявлению перспективных направлений внедрения технологии в различных отраслях.

В первой главе диссертации проведён детальный обзор современного состояния и направлений развития систем VLC. Были проанализированы ключевые научные публикации, отражающие технические и прикладные аспекты технологии: от моделей позиционирования и архитектур OCC, MIMO и OFDM-эквализации до интеграции VLC с элементами умных домов и IoT-инфраструктуры. Отмечено, что VLC уже выходит за рамки лабораторных прототипов и получает практическое применение в медицине, логистике, образовании и автоматизированных системах. В работах подчёркивается важность моделирования многолучевого распространения и отражений, использования методов машинного обучения, а также необходимость учёта параметров освещённости и углового положения компонентов системы. Проведённый анализ позволил зафиксировать существующие научные вызовы: отсутствие универсальных стандартов MAC-уровня, сложность масштабирования, потребность в гибридизации с радиоканалами и низкая чувствительность миниатюрных приёмников.

Во второй главе разработана универсальная математическая модель системы VLC, учитывающая как прямую, так и отражённую компоненты светового сигнала. Модель охватывает все ключевые элементы канала связи: оптическую мощность, геометрию помещения, углы приёма и излучения, отражающую способность поверхностей и параметры приёмника. На основе выведенных уравнений были рассчитаны зависимости между отношением сигнал/шум (SNR), вероятностью битовой ошибки (BER), расстоянием, мощностью источника и характеристиками фотоприёмника. Полученные аналитические выражения позволили количественно оценить пределы допустимых параметров, при которых обеспечивается устойчивый приём и надёжная передача данных. Особое внимание уделено моделированию интерференции, влияния внешнего освещения и расчёту чувствительности приёмника. Разработана структурная архитектура VLC-системы, описаны типовые сценарии установки оборудования и даны рекомендации по выбору оптических и электронных компонентов.

В третьей главе проведён прикладной анализ эффективности и масштабируемости разработанной модели. С использованием симуляционной среды MATLAB получены численные оценки параметров BER и SNR при различных конфигурациях передатчиков и приёмников, подтверждены теоретические выводы и выявлены оптимальные режимы работы системы. Установлено, что при мощности 1.5–2 Вт и чувствительности фотоприёмника от 0.4 А/Вт можно обеспечить BER ниже 10^{-6} на расстояниях до 3.5–4 м. Показано, что увеличение плотности LED-источников в помещении ведёт к росту SNR до определённого порога, после чего эффект насыщается, и дальнейшее уплотнение становится неэффективным. Эти данные послужили основой для практических рекомендаций по проектированию распределённых VLC-сетей.

Отдельное внимание в главе уделено отраслевым сценариям применения VLC. В медицине подтверждена пригодность технологии для создания стерильных и защищённых каналов в палатах и операционных, в том числе для передачи данных от носимых устройств и медицинского оборудования. В образовательной среде VLC обеспечивает безопасную и изолированную передачу между преподавателем и учащимися, снижает нагрузку на Wi-Fi и может быть использована для организации индивидуальных учебных зон. В транспортной инфраструктуре рассмотрены сценарии V2X, внутрисалонной связи и автоматизации, где модель позволяет точно рассчитывать зоны приёма и влияние угловых отклонений. В сегменте умных домов и IoT показана возможность построения локализованных энергоэффективных сетей, интегрированных с системой освещения и обладающих высоким уровнем защищённости за счёт ограниченного распространения сигнала.

Таким образом, совокупность теоретических разработок, математических расчётов, численного моделирования и отраслевых сценариев подтверждает высокую научную и практическую значимость проведённого исследования. Разработанная модель VLC-системы может использоваться как основа для проектирования и оценки эффективности связи в помещениях различного назначения. Внедрение полученных результатов способствует оптимизации архитектуры беспроводных сетей, повышению надёжности и устойчивости связи, снижению электромагнитной нагрузки и энергопотребления. Будущие исследования могут быть направлены на разработку адаптивных протоколов управления, мультizonных и многоканальных решений, а также интеграцию VLC с нейросетевыми средствами прогнозирования и интеллектуального управления.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года № 127.

ГОСО РК 5.04.034-2011 – Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан послевузовское образование. Докторантура.

ГОСТ 7.12-93 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.

ГОСТ 7.32 – 2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

СТ РК ГОСТ Р 15.011-2005 – Патентные исследования.

ГОСТ 8.417-2002 – Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

VLC – оптическая беспроводная связь на базе видимого света (Visible Light Communication)
Li-Fi – технология беспроводной связи на основе света (Light Fidelity)
LED – светоизлучающий диод (Light Emitting Diode)
PD – фотодиод (Photodiode)
APD – лавинный фотодиод (Avalanche Photodiode)
Tx – передатчик (Transmitter)
Rx – приёмник (Receiver)
SNR – отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio)
BER – битовая ошибка передачи (Bit Error Rate)
FOV – угол обзора (Field of View)
LOS – прямая видимость (Line of Sight)
NLOS – отсутствие прямой видимости (Non-Line of Sight)
OOK – модуляция с включением/выключением несущей (On-Off Keying)
PWM – широтно-импульсная модуляция (Pulse Width Modulation)
OFDM – ортогональное частотное мультиплексирование (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
FEC – прямое исправление ошибок (Forward Error Correction)
CDR – восстановление синхронизации и данных (Clock and Data Recovery)
IoT – интернет вещей (Internet of Things)
RGB – модель цветового представления (красный, зелёный, синий – Red, Green, Blue)
MATLAB – среда математического моделирования и технических вычислений (Matrix Laboratory)
dc – постоянный ток (Direct Current)
Hz – герц, единица частоты
dBm – уровень мощности в децибелах относительно 1 мВ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Mapunda, G.A., Ramogomana, R., Marata, L. "Indoor Visible Light Communication: A Tutorial and Survey." *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, Article ID 8881305. <https://doi.org/10.1155/2020/8881305>
- 2 Koonen, T. "Indoor Optical Wireless Systems: Technology, Trends, and Applications." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 8, 2018, pp. 1459–1467. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2795698>
- 3 Rehman, S., et al. "Visible Light Communication: A System Perspective—Overview and Challenges." *Sensors*, vol. 19, 2019, 1153. <https://doi.org/10.3390/s19051153>
- 4 Matheus, L.E.M., et al. "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, 2019, pp. 3204–3237. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2913348>
- 5 Loureiro, P.A., et al. "Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques." *Photonics*, vol. 10, no. 9, 2023, 993. <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
- 6 Armstrong, J. "OFDM for Optical Communications." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, 2009, pp. 189–204. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010061>
- 7 Luo, J., Fan, L., Li, H. "Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art." *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, 2017, pp. 2871–2893. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2743228>
- 8 Mukherjee, M., Noronha, K. "Evaluation of Illumination and Received Power for Realistic LED Layout for Indoor VLC." *IEEE*, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICICCS58233.2023.10145375>
- 9 Ghassemlooy, Z., Popoola, W., Rajbhandari, S. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press, 2013.
- 10 Zvanovec, S., et al. "Visible Light Communications Towards 5G." *Radioengineering*, vol. 24, no. 1, 2015, pp. 1–9.
- 11 E. Udvary, "Visible Light Communication Survey," *Infocommunications Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 22–28, Jun. 2019. DOI: [10.36244/ICJ.2019.2.3.ResearchGate](https://doi.org/10.36244/ICJ.2019.2.3.ResearchGate)
- 12 K. Wang et al., "A Review of Indoor Optical Wireless Communication," *Photonics*, vol. 11, no. 8, p. 722, 2024. DOI: [10.3390/photonics11080722](https://doi.org/10.3390/photonics11080722).MDPI
- 13 P. A. Loureiro et al., "Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques," *Photonics*, vol. 10, no. 9, p. 993, 2023. DOI: [10.3390/photonics10090993](https://doi.org/10.3390/photonics10090993).
- 14 J. Qiu et al., "Channel Modelling for Indoor Visible Light Communications," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2169, p. 20190187, 2020. DOI: [10.1098/rsta.2019.0187](https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0187).royalsocietypublishing.org+1PMC+1

- 15 P. Kaur et al., "Predictive Modeling for VLC Systems: An Artificial Neural Networks Approach to Real-World Performance," *Journal of Optical Communications*, 2024. DOI: [10.1007/s12596-024-02426-4](https://doi.org/10.1007/s12596-024-02426-4).[SpringerLink](#)
- 16 S. Arnon, *Visible Light Communication*. Cambridge University Press, 2015.[Википедия+1Википедия+1](#)
- 17 M. Z. Afgani et al., "Visible Light Communication Using OFDM," in *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, 2006, pp. 129–134. DOI: [10.1109/TRIDENTCOM.2006.1649134](https://doi.org/10.1109/TRIDENTCOM.2006.1649134).
- 18 A. Al-Kinani et al., "A 3D Non-Stationary GBSM for Vehicular Visible Light Communication MISO Channels," *arXiv preprint*, arXiv:2007.14036, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2007.14036>.[arXiv+1arXiv+1](#)
- 19 W. Gu et al., "Impact of Multipath Reflections on the Performance of Indoor Visible Light Positioning Systems," *arXiv preprint*, arXiv:1505.07534, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1505.07534>.[arXiv](#)
- 20 J. F. Gutiérrez and J. M. Quintero, "Visible Light Communication: A Short Review," *Revista Ontare*, vol. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/376292610_Visible_Light_Communication_on_a_Short_Review.
- 21 F. Miramirkhani and M. Uysal, "Channel modelling for indoor visible light communications," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2169, p. 20190187, 2020. DOI: [10.1098/rsta.2019.0187](https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0187).[ResearchGate+1ResearchGate+1](#)
- 22 A. Poulou, "Simulation of an Indoor Visible Light Communication System Using Optisystem," *Signals*, vol. 3, no. 4, pp. 765–793, 2022. DOI: [10.3390/signals3040046](https://doi.org/10.3390/signals3040046).[MDPI](#)
- 23 P. Luo, Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, E. Bentley, A. Burton, and X. Tang, "Performance analysis of a car-to-car visible light communication system," *Applied Optics*, vol. 54, no. 7, pp. 1696–1706, 2015. DOI: [10.1364/AO.54.001696](https://doi.org/10.1364/AO.54.001696).[opg.optica.org+1Nature+1](#)
- 24 F. M. Elamrawy, A. A. El Aziz, S. Khamis, and H. Kasem, "Performance analysis of an indoor visible light communication system using LED configurations and diverse photodetectors," *Scientific Reports*, vol. 15, Article number: 16064, 2025. DOI: [10.1038/s41598-025-99643-z](https://doi.org/10.1038/s41598-025-99643-z).[Nature](#)
- 25 S. V. Tiwari, A. Sewaiwar, and Y. H. Chung, "Smart home technologies using visible light communication," in *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2015, pp. 379–380. DOI: [10.1109/ICCE.2015.7066476](https://doi.org/10.1109/ICCE.2015.7066476).[Nature](#)
- 26 P. Kaur, A. Sharma, and M. Singh, "Predictive Modeling for VLC Systems: An Artificial Neural Networks Approach to Real-World Performance," *Journal of Optical Communications*, 2024. DOI: [10.1007/s12596-024-02426-4](https://doi.org/10.1007/s12596-024-02426-4).
- 27 A. Al-Kinani, M. A. Khalighi, and S. Bourenane, "A 3D Non-Stationary GBSM for Vehicular Visible Light Communication MISO Channels," *arXiv*

- preprint, arXiv:2007.14036, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2007.14036>.
- 28 W. Gu, Z. Ghassemloooy, H. L. Minh, and E. Bentley, "Impact of Multipath Reflections on the Performance of Indoor Visible Light Positioning Systems," *arXiv preprint*, arXiv:1505.07534, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1505.07534>.
- 29 J. F. Gutiérrez and J. M. Quintero, "Visible Light Communication: A Short Review," *Revista Ontare*, vol. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/376292610_Visible_Light_Communication_on_a_Short_Review.
- 30 A. M. Căilean and S. A. Avătămăniței, "Driving toward Connectivity: Vehicular Visible Light Communications Receiver with Adaptive Field of View for Enhanced Noise Resilience and Mobility," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2814, 2024. DOI: [10.3390/s24092814](https://doi.org/10.3390/s24092814).
- 31 Wang, R., et al. "A Survey of Visible-Light-Communication-Based Indoor Positioning Systems." *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, p. 5197. <https://doi.org/10.3390/s24165197>
- 32 Zhu, Z., et al. "A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges." *arXiv preprint*, arXiv:2401.13893, 2024. <https://arxiv.org/abs/2401.13893>
- 33 Aboagye, S., et al. "RIS-Assisted Visible Light Communication Systems: A Tutorial." *arXiv preprint*, arXiv:2204.07198, 2022. <https://arxiv.org/abs/2204.07198>
- 34 Yang, C., et al. "Signal Space Diversity Techniques for Indoor Optical Wireless Communications." *Optica Networks*, 2023. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=Networks-2023-NeM4B.2>
- 35 Zhu, B., et al. "Low-Complexity Visible Light Positioning and Rotation Estimation Based on Eigenvalue Decomposition." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 22, 2022, pp. 7072–7083. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3188628>
- 36 Xu, S., et al. "Indoor High Precision Positioning System Based on Visible Light Communication and Location Fingerprinting." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 17, 2023, pp. 5564–5576. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3265171>
- 37 Bao, J., et al. "ARM-Based Indoor RGB-LED Visible Light Communication System." *Scientific Programming*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8290106>
- 38 IEEE Standard Association. "IEEE 802.11bb: Light Communication Standard for Short-Range Optical Wireless." IEEE, 2023. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10892/>
- 39 ITU-T Recommendation G.9991. "High-Speed Indoor Visible Light Communication." ITU-T, 2022. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9991/en>

- 40 Salama, W.M., et al. "VLC Localization: Deep Learning Models by Kalman Filter Algorithm Combined with RSS." *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, 2022, p. 584. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03396-8>
- 41 Singh, A., et al. "Optimal LED Power Allocation Framework for a Location-Assisted Indoor Visible Light Communication System." *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 3, 2022, Art no. 7329814. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3173435>
- 42 Wang, K., et al. "A Review of Indoor Optical Wireless Communication." *Photonics*, vol. 11, no. 8, 2024, p. 722. <https://doi.org/10.3390/photonics11080722>
- 43 Kaur, P., et al. "Predictive Modeling for VLC Systems: An Artificial Neural Networks Approach to Real-World Performance." *Journal of Optical Communications*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02426-4>
- 44 Elamrawy, F.M., et al. "Performance Analysis of an Indoor Visible Light Communication System Using LED Configurations and Diverse Photodetectors." *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, Article number: 16064. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99643-z>
- 45 Luo, P., et al. "Performance Analysis of a Car-to-Car Visible Light Communication System." *Applied Optics*, vol. 54, no. 7, 2015, pp. 1696–1706. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001696>
- 46 Arnon, S. *Visible Light Communication*. Cambridge University Press, 2015. ISBN: 9781107009693
- 47 Qiu, J., et al. "Channel Modelling for Indoor Visible Light Communications." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2169, 2020, p. 20190187. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0187>
- 48 Udvary, E. "Visible Light Communication Survey." *Infocommunications Journal*, vol. 11, no. 2, 2019, pp. 22–28. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2019.2.3>
- 49 Matheus, L.E.M., et al. "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, 2019, pp. 3204–3237. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2913348>
- 50 Loureiro, P.A., et al. "Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques." *Photonics*, vol. 10, no. 9, 2023, p. 993. <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
- 51 Wang, R., et al. "A Survey of Visible-Light-Communication-Based Indoor Positioning Systems." *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, p. 5197. <https://doi.org/10.3390/s24165197>
- 52 Zhu, Z., et al. "A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges." *arXiv preprint*, arXiv:2401.13893, 2024. <https://arxiv.org/abs/2401.13893>
- 53 Aboagye, S., et al. "RIS-Assisted Visible Light Communication Systems: A Tutorial." *arXiv preprint*, arXiv:2204.07198, 2022. <https://arxiv.org/abs/2204.07198>
- 54 Yang, C., et al. "Signal Space Diversity Techniques for Indoor Optical Wireless Communications." *Optica Networks*, 2023. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=Networks-2023-NeM4B.2>

- 55 Zhu, B., et al. "Low-Complexity Visible Light Positioning and Rotation Estimation Based on Eigenvalue Decomposition." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 22, 2022, pp. 7072–7083. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3188628>
- 56 Xu, S., et al. "Indoor High Precision Positioning System Based on Visible Light Communication and Location Fingerprinting." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 17, 2023, pp. 5564–5576. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3265171>
- 57 Bao, J., et al. "ARM-Based Indoor RGB-LED Visible Light Communication System." *Scientific Programming*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8290106>
- 58 IEEE Standard Association. "IEEE 802.11bb: Light Communication Standard for Short-Range Optical Wireless." IEEE, 2023. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10892/>
- 59 ITU-T Recommendation G.9991. "High-Speed Indoor Visible Light Communication." ITU-T, 2022. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9991/en>
- 60 Salama, W.M., et al. "VLC Localization: Deep Learning Models by Kalman Filter Algorithm Combined with RSS." *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, 2022, p. 584. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03396-8>
- 61 Singh, A., et al. "Optimal LED Power Allocation Framework for a Location-Assisted Indoor Visible Light Communication System." *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 3, 2022, Art no. 7329814. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3173435>
- 62 Wang, K., et al. "A Review of Indoor Optical Wireless Communication." *Photonics*, vol. 11, no. 8, 2024, p. 722. <https://doi.org/10.3390/photonics11080722>
- 63 Kaur, P., et al. "Predictive Modeling for VLC Systems: An Artificial Neural Networks Approach to Real-World Performance." *Journal of Optical Communications*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02426-4>
- 64 Elamrawy, F.M., et al. "Performance Analysis of an Indoor Visible Light Communication System Using LED Configurations and Diverse Photodetectors." *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, Article number: 16064. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99643-z>
- 65 Luo, P., et al. "Performance Analysis of a Car-to-Car Visible Light Communication System." *Applied Optics*, vol. 54, no. 7, 2015, pp. 1696–1706. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001696>
- 66 Arnon, S. *Visible Light Communication*. Cambridge University Press, 2015. ISBN: 9781107009693
- 67 Qiu, J., et al. "Channel Modelling for Indoor Visible Light Communications." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2169, 2020, p. 20190187. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0187>
- 68 Udvary, E. "Visible Light Communication Survey." *Infocommunications Journal*, vol. 11, no. 2, 2019, pp. 22–28. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2019.2.3>

- 69 Matheus, L.E.M., et al. "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, 2019, pp. 3204–3237. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2913348>
- 70 Loureiro, P.A., et al. "Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques." *Photonics*, vol. 10, no. 9, 2023, p. 993. <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
- 71 Wang, R., et al. "A Survey of Visible-Light-Communication-Based Indoor Positioning Systems." *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, p. 5197. <https://doi.org/10.3390/s24165197>
- 72 Zhu, Z., et al. "A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges." *arXiv preprint*, arXiv:2401.13893, 2024. <https://arxiv.org/abs/2401.13893>
- 73 Aboagye, S., et al. "RIS-Assisted Visible Light Communication Systems: A Tutorial." *arXiv preprint*, arXiv:2204.07198, 2022. <https://arxiv.org/abs/2204.07198>
- 74 Yang, C., et al. "Signal Space Diversity Techniques for Indoor Optical Wireless Communications." *Optica Networks*, 2023. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=Networks-2023-NeM4B.2>
- 75 Zhu, B., et al. "Low-Complexity Visible Light Positioning and Rotation Estimation Based on Eigenvalue Decomposition." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 22, 2022, pp. 7072–7083. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3188628>
- 76 Xu, S., et al. "Indoor High Precision Positioning System Based on Visible Light Communication and Location Fingerprinting." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 17, 2023, pp. 5564–5576. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3265171>
- 77 Bao, J., et al. "ARM-Based Indoor RGB-LED Visible Light Communication System." *Scientific Programming*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8290106>
- 78 IEEE Standard Association. "IEEE 802.11bb: Light Communication Standard for Short-Range Optical Wireless." IEEE, 2023. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10892/>
- 79 ITU-T Recommendation G.9991. "High-Speed Indoor Visible Light Communication." ITU-T, 2022. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9991/en>
- 80 Salama, W.M., et al. "VLC Localization: Deep Learning Models by Kalman Filter Algorithm Combined with RSS." *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, 2022, p. 584. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03396-8>
- 81 Singh, A., et al. "Optimal LED Power Allocation Framework for a Location-Assisted Indoor Visible Light Communication System." *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 3, 2022, Art no. 7329814. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3173435>
- 82 Kaur, P., et al. "Predictive Modeling for VLC Systems: An Artificial Neural Networks Approach to Real-World Performance." *Journal of Optical Communications*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02426-4>

83 Elamrawy, F.M., et al. "Performance Analysis of an Indoor Visible Light Communication System Using LED Configurations and Diverse Photodetectors." *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, Article number: 16064. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99643-z>

84 Luo, P., et al. "Performance Analysis of a Car-to-Car Visible Light Communication System." *Applied Optics*, vol. 54, no. 7, 2015, pp. 1696–1706. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001696>

85 Arnon, S. *Visible Light Communication*. Cambridge University Press, 2015. ISBN: 9781107009693

86 Weng, H., Wang, W., Chen, Z., Zhu, B., Li, F. "A Review of Indoor Optical Wireless Communication." *Photonics*, vol. 11, no. 8, 2024, p. 722. <https://doi.org/10.3390/photonics11080722>

87 Zhu, Z., Yang, Y., Chen, M., Guo, C., Cheng, J., Cui, S. "A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges." *arXiv preprint*, arXiv:2401.13893, 2024. <https://arxiv.org/abs/2401.13893>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

На схеме представлены основные блоки, моделирующие работу VLC-системы: LED-передатчик, оптический канал передачи, фотоприёмник с усилителем, блоки расчёта коэффициента передачи, шумов, отношения сигнал/шум (SNR), вероятности ошибки (BER) и дальности связи. Блок-схема иллюстрирует поэтапное прохождение сигнала и реализацию всех уравнений (2.16)–(2.19) на базе введённых параметров.

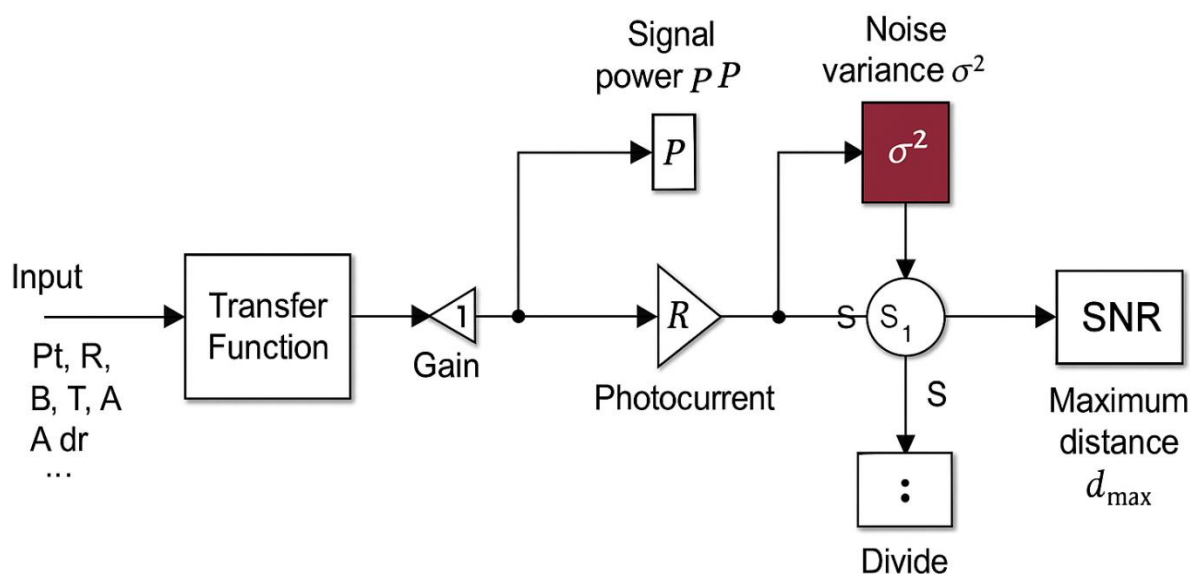


Рисунок А1 – Схема расчётной модели системы VLC в среде MATLAB

```
>> % Входные параметры
>> Pt = 1.5;           % Мощность передатчика, Вт
>> R = 0.5;            % Чувствительность фотоприемника, А/Вт
>> A = 1e-4;           % Активная площадь приемника, м²
>> Ts = 1;             % Передаточная функция фильтра
>> n = 1.5;            % Показатель преломления линзы
>> F0V = 60;           % Угол поля зрения, градусов
>> B = 20e6;           % Ширина полосы, Гц
>> T = 300;            % Температура, К
>> q = 1.6e-19;        % Заряд электрона, Кл
>> k = 1.38e-23;       % Постоянная Больцмана, Дж/К
>> RL = 1000;          % Сопротивление нагрузки, Ом
>> idark = 1e-9;       % Темновой ток, А
>> d = 2;              % Расстояние, м
>> phi = 0; psi = 0;   % Углы, рад

>> % Формула коэффициента передачи H (из ур. 2.3)
>> m = -log(2)/log(cosd(F0V/2));
>> H = ( (m+1)*A ) / ( 2*pi*d^2 ) * cosd(phi)^m * Ts * (n^2 / sind(F0V)^2) * cosd(psi);
```

Рисунок А2 – Расчёт коэффициента передачи и фототока по уравнениям в среде MATLAB

```

\textbf{Расчёт коэффициента передачи  $H_{\text{LoS}}$ , мощности приёмного сигнала  $P_r$  и фототока  $I_{\text{ph}}$ }

\text{Формулы:}
(2.3) \quad H_{\text{LoS}} = \frac{(m+1) A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{2\pi d^2}
(2.6) \quad P_r = P_t \cdot H_{\text{total}}
(2.7) \quad I_{\text{ph}} = R \cdot P_r

\text{Входные параметры:}
P_t = 1.5 \text{ Вт}, \quad A = 1 \text{ см}^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^2, \quad R = 0.5 \text{ А/Вт}
\phi = \psi = 0^\circ \Rightarrow \cos(\phi) = \cos(\psi) = 1, \quad m = 1, \quad d = 2 \text{ м}
T_s(\psi) = 1, \quad g(\psi) = \frac{n^2 \sin^2(\psi_c)}{2}, \quad n = 1.5, \quad \psi_c = 60^\circ

\text{Вычисления:}
g(\psi) = \frac{1.5^2 \sin^2(60^\circ)}{2} \approx 3.0
H_{\text{LoS}} = \frac{(1+1) \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 3.0 \cdot 1}{2\pi \cdot 2^2} \approx 1.19 \times 10^{-5}
P_r = 1.5 \cdot 1.19 \times 10^{-5} = 1.785 \times 10^{-5} \text{ Вт}
I_{\text{ph}} = 0.5 \cdot 1.785 \times 10^{-5} = 8.93 \times 10^{-6} \text{ А}

```

Рисунок А3 – Определение шумовой дисперсии системы и уровня внешнего тока по уравнению

Расчет дисперсии шума и SNR на основе уравнений (2.8) и (2.9)

Уравнение (2.8):

$$\sigma_n^2 = 2qIB + 4kTB/R_L + 2i_{\text{dark}}B$$

Подставим значения:

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$I = 1 \times 10^{-3} \text{ А}$$

$$B = 20 \times 10^6 \text{ Гц}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$R_L = 1000 \text{ Ом}$$

$$i_{\text{dark}} = 1 \times 10^{-9} \text{ А}$$

$$\sigma_n^2 = 2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 1 \times 10^{-3} \cdot 20 \times 10^6 + 4 \cdot 1.38 \times 10^{-23} \cdot 300 \cdot 20 \times 10^6 / 1000 + 2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 1 \times 10^{-9} \cdot 20 \times 10^6 = 6.73 \times 10^{-15} \text{ А}^2$$

Уравнение (2.9):

$$\text{SNR} = I^2 / \sigma_n^2 = (1 \times 10^{-3})^2 / 6.73 \times 10^{-15}$$

$$\text{SNR} = 1.49 \times 10^8$$

Рисунок А4 – Расчёт минимальной чувствительности приёмника с заданными SNR и параметрами приёма

% Расчёт полной дисперсии шума (уравнение 2.17)

q = 1.6e-19; B = 20e6; R = 0.5; Pr = 5e-3;

k = 1.38e-23; T = 300; RL = 1000; idark = 1e-9;

sigma_shot2 = 2 * q * R * Pr * B;

sigma_thermal2 = (4 * k * T * B) / RL;

sigma_dark2 = 2 * q * idark * B;

sigma_total2 = sigma_shot2 + sigma_thermal2 + sigma_dark2;

% Расчёт SNR (уравнение 2.18)

I_signal = R * Pr;

SNR = (I_signal ** 2) / sigma_total2;

% Расчёт предельного расстояния d_max (уравнение 2.19)

Pt = 2; m = 1; A = 1e-4; phi = 0; psi = 0;

cos_phi = cosd(phi); cos_psi = cosd(psi);

Hmin = 0.001;

d_max = ((Pt * (m + 1) * A * cos_phi ** m * cos_psi) / (2 * pi * Hmin)) ** (1 / 2);

Рисунок А5 – Совместные вычисления: полная шумовая дисперсия, итоговое SNR и предельное расстояние связи

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу

Шакир Акмардин Шухратулы

по ОП 7М06202 – Телекоммуникация

На тему: «Исследование системы оптической беспроводной связи для
внутреннего использования»

Выполнено:

- а) теоретическая и практическая часть на 73 листах
- б) графическая часть – 6 рисунков

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Магистерская диссертация посвящена исследованию систем оптической беспроводной связи на базе технологии VLC для внутренних помещений. На фоне роста объёмов передаваемой информации, дефицита радиочастотного спектра и требований к информационной безопасности, развитие альтернативных решений, таких как VLC, приобретает особую актуальность. Работа рассматривает параметры BER, SNR, влияние геометрии помещения и освещённости, сочетая теорию и моделирование в MATLAB.

Развитие "умных зданий", IoT и потребность в безопасной связи усиливают значимость темы. Математическая модель и численные эксперименты позволяют сделать выводы, полезные для практического применения технологии.

Оценка работы

Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне, Диссертация выполнена на высоком уровне, содержит логичную структуру, глубокий анализ и практическую ценность. Автор успешно решил поставленные задачи, подтвердив применимость моделей. Работа соответствует требованиям к магистерским диссертациям, отличается актуальностью и научной новизной.

Работа заслуживает оценки "отлично" (А, 90%), а автор рекомендуется к присуждению степени магистра по образовательной программе 7М06202 – «Телекоммуникация».

Рецензент

Phd доктор, ассоциированный профессор

(должность, уч. степень, звание)

Көшкінбаев С.Ж.

(подпись)

«22»

2025 г.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на диссертационную работу

Шакир Акмардин Шухратұлы

по ОП 7M06202 – Телекоммуникация

На тему: «Исследование системы оптической беспроводной связи для
внутреннего использования»

Данная магистерская диссертация посвящена актуальной задаче, связанной с развитием технологий в области оптической беспроводной связи. Работа направлена на исследование и математическое моделирование систем передачи данных на основе технологии VLC для применения в условиях внутренних помещений. Тема важна в контексте современных требований к скорости, безопасности и энергоэффективности телекоммуникаций.

В процессе выполнения диссертации автор продемонстрировал высокий уровень подготовки, самостоятельности и системного мышления. В работе выполнен детальный обзор современного состояния VLC-технологий, разработана математическая модель с учётом физических факторов, проведено моделирование параметра в среде MATLAB и сформулированы практические рекомендации по размещению компонентов системы.

Работа отличается чёткой структурой, обоснованными выводами и глубиной анализа. Автор умеет критически оценивать литературу и находить эффективные решения. Результаты исследования имеют прикладное значение и могут быть использованы при проектировании беспроводных сетей в умных зданиях, образовательных учреждениях и специализированных объектах.

Диссертация полностью соответствует требованиям и заслуживает оценки «отлично» (А, 90%). Автор достоин присуждения степени «магистра техники и технологии» по образовательной программе 7M06202 – «Телекоммуникация».

Научный руководитель

Профессор канд. техн. наук
(должность, уч. степень, звание)

А. Смаилов
(подпись)

«30»

мая



Смаилов Н.К.

**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: Шакир Акмардин Шухратұлы

Тақырыбы: Исследование системы оптической беспроводной связи для внутреннего использования

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.5

Дәйексөз (35): 3.3

Әріптерді ауыстыру: 9

Аралықтар: 1

Шағын кеңістіктер: 2

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:

2025-05-22

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Шакир Акмардин Шухратұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование системы оптической беспроводной связи для внутреннего использования

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.2

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 2

Знаки из других алфавитов: 9

Интервалы: 1

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:

2025-05-22

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Шакир Акмардин Шухратұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование системы оптической беспроводной связи для внутреннего использования

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.2

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 2

Знаки из других алфавитов: 9

Интервалы: 1

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:

2025-05-22

Дата



Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт