

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1 Обзор системы VLC	13
1.1 Li-Fi и VLC	13
1.2 Li-Fi передатчик	13
1.3 Li-Fi приёмник	16
2 Типы компонентов	19
2.1 Фотодиоды	19
2.2 Линзы	20
3 Методы модулирования излучения	21
3.1 On-Off Keying	21
3.2 Методы импульсной модуляции	22
3.2.1 Модуляция длительности импульса	23
3.2.2 Фазово-амплитудная модуляция	23
3.2.3 Мультиплексирование с ортогональным частотным разделение каналов (OFDM)	25
3.2.4 Цветовая манипуляция (CSK)	25
4 Моделирование оптической системы	28
4.1 Базовая система	28
4.2 Базовая система с собирающей линзой	30
4.3 Исследование диаграммы направленности приёмника	33
5 Экспериментальные исследования системы	36
Заключение	39
Приложение А Результаты симуляции	

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РЧ — радио частоты.

VLC (visible light communication) — связь по видимому свету.

ИК — инфракрасный.

LED (Light emitting diode) — светодиод.

PLC (Power-line communication) — связь по электросети.

PoE (Power over Ethernet) — питание через Ethernet.

RGB (Red-green-blue) — красный-синий-зелёный.

MIMO (Multiple-input-multiple-outputs) — несколько входов и выходов.

IM/DD (Intensity modulation and direct detection) — модуляция интенсивности и прямое детектирование.

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

OWC (Optical wireless communication) — оптическая беспроводная коммуникация.

Li-Fi — light fidelity.

Wi-Fi — wireless fidelity.

IM — intensity modulation.

DD — direct detection.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) — институт электроники и инженеров электроники.

LD (laser diode) — лазерный диод.

QE (quantum efficiency) — квантовая эффективность.

FPS (frames per second) — кадры в секунду.

ИМ — импульсная модуляция.

CSM (color shift modulation) — цветовая манипуляция.

NRZ — non-return-to-zero [on-off-keying].

PWM (pulse width modulation) — модуляция длительности импульса.

PPM (pulse position modulation) — фазово-амплитудная модуляция.

OPPM (overlapping pulse position modulation) — перекрывающаяся фазово-амплитудная модуляция.

MPPM (multipulse pulse position modulation) — многоимпульсная фазово-амплитудная модуляция.

VPPM (variable pulse position modulation) — переменная фазово-амплитудная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Спустя тридцать лет после появления первых коммерческих мобильных коммуникационных систем, беспроводная связь эволюционировала в обыкновенное удобство как газ или электричество. Экспоненциальный рост в мобильном трафике в течение последних трёх десятилетий привел к масштабному разворачиванию беспроводных систем. Как следствие, ограниченный доступный РЧ-диапазон является объектом постоянного переиспользования и межканальной интерференции, что значительно ограничивает ёмкость сетей. Таким образом, было много различных предупреждений о грядущем «кризисе РЧ спектра» [1], так как требования к передачи мобильных данных продолжают расти, в то время как спектральная эффективность сетей насыщается, даже несмотря на введение новых стандартов и значительный технологический прогресс в этой области. По оценкам, к 2022 году более 77 эксабайтов (10^{60} байт) трафика будет передаваться через мобильные устройства каждый месяц (около одного зеттабайта в год) [2]. В середине прошлого десятилетия было предложено использование связи по видимому свету (VLC) в качестве потенциального решения для избежания «кризиса РЧ спектра».

В течение прошлого десятилетия значительные усилия были направлены на изучение альтернативных частей электро-магнитного спектра, которые потенциально смогут разгрузить большую часть трафика из загруженного РЧ диапазона. Было продемонстрировано использование миллиметровых волн в коммуникации в 28 ГГц диапазоне, а так же использование видимого и ИК света. Это особенно полезно, так как освещение – удобство, которое имеется практически в любой жилой среде и для которого существует готовая инфраструктура. Использование видимого света для высокоскоростных линий связи становится возможно из-за использования LED. В этом смысле концепт комбинирования функций освещения и коммуникации позволяет экономить энергию (и деньги) и сократить углеродный след. Во-первых, установка точек доступа является достаточно тривиальной задачей, так как можно переиспользовать уже существующую инфраструктуру с использованием готовых технологий, таких как связь по электросети (PLC) и питание через Ethernet (PoE). Во-вторых, так как освещение обычно работает в по-

мещениях даже в течение светлого времени суток, дополнительное питание передатчиков будет незначительным. Кроме того, открывается возможность использования Li-Fi для Интернета Вещей – большого количества умных бытовых устройств, каждому из которых необходимо интернет-соединение для корректной работы. В настоящее время они используют Wi-Fi или проприетарные стандарты связи, что приводит к ещё большей загрузке РЧ-сети и ухудшению совместимости между друг другом. Помимо этого, видимый свет включает в себя сотни ТГц свободного канала, что на четыре порядка больше, чем полный РЧ спектр до 30 ГГц, включая миллиметровый спектр. Оптическое излучение, в общем, не интерферирует с другими радио волнами и не мешает работе чувствительного электрического оборудования. Таким образом, свет идеален для беспроводного покрытия в местах, чувствительных к электро-магнитному излучению (например, больницы, самолёты, топливно-химические и атомные электростанции и другие). Помимо этого, так как свет не может проникать через непрозрачные поверхности (стены), создается более высокий уровень безопасности соединения. Эта же особенность может быть использована для избежания интерференции между двумя соседними сетями.

В течение последних десяти лет, было проведено значительное количество исследований об улучшении скорости передачи между двумя устройствами с использованием существующих светодиодов в лабораторных условиях. В 2012 году была достигнута скорость передачи данных выше 1 Гб/с с использованием белых фосфорных LED [3], и 3.4 Гб/с с помощью красно-сине-зелёного (RGB) LED [4]. Также была продемонстрирована [5] схожая гигабитная система с белым фосфорным LED в виде матрицы 4 на 4 в конфигурации несколько входов и выходов (MIMO). Теоретическая структура для достижимой ёмкости модуляции интенсивности и прямого детектирования (IM/DD) с использованием мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) была показана в [6]. Для успешной реализации системы мобильной связи необходима готовая сетевая система. Это и есть то, что называется Li-Fi – сетевое мобильное высокоскоростное VLC решение для беспроводной связи [7]. Гарольд Хаас, которому принадлежит идея создания Li-Fi [8], предлагает использовать Li-Fi как комплиментар-

ную сеть для облегчения нагрузки на РЧ спектр, так как значительная часть нагрузки на текущие Wi-Fi сети сможет быть перемещена на Li-Fi сети.

1 ОБЗОР СИСТЕМЫ VLC

1.1 Li-Fi и VLC

Концепт VLC был представлен Гаральдом Хаасом на конференции TED Talk в 2011 году [?]. Было предложено использование модуляции интенсивности излучения – IM (intensity modulation), а для приёмника (фотодетектор) применять прямое детектирование – DD (direct detection). Работа такой системы описывается стандартом IEEE 802.15.7 [?]. VLC предлагается использовать как замену проводам и волокну для передачи данных [8], а именно для соединения формата «от точки к точке», то есть предполагается, что каждый передатчик соединен только с одним приёмником.

Этот формат соединения и отличается VLC от Li-Fi: последний описывает сеть с двусторонней коммуникацией и наличием многих передатчиков и приёмников, предполагается соединение между одним источником и многими приёмниками – соединение формата «от многих точек к точке». Такой тип соединения схож с уже существующим и широко распространенным протоколом Wi-Fi: он тоже позволяет обеспечить мобильность пользователей и незаметное переключение между передатчиками. По сути, стандарт Li-Fi включает в себя стандарт VLC, то проиллюстрировано на схеме 1.1.

1.2 Li-Fi передатчик

Зачастую в системах передачи информации с помощью видимого света в качестве передатчика выбирается светодиодный светильник¹ [?, ?, ?]. Он представляет из себя полноценное осветительное устройство, состоящее из LED источник излучения, балласта, корпуса и других компонентов. LED источник может состоять из одного или нескольких светодиодов, которые управляются с помощью управляющей микросхемы – контроллера, который контролирует ток, питающий светодиод и меняющий его яркость. Когда светодиодный светильник используется для коммуникации, контроллер модернизируется для передачи данных с помощью модуляции излучения. Примером простейшей модуляции является On-Off Keying, то есть «нули» и «единицы» передаются как два разных уровня интенсивности света.

¹LED luminaire

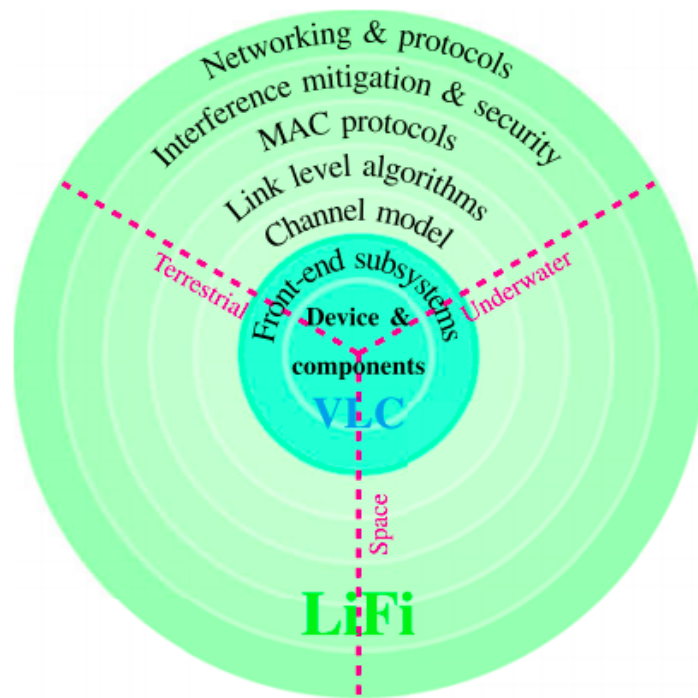


Рисунок 1.1 — Принципиальная схема Li-Fi и VLC [8]

Важнейшим преимуществом Li-Fi системы является возможность использования её для освещения вместо обычных светильников. В таком случае, функции передачи информации и освещения не должны мешать работе друг друга. Белый свет является преобладающим, так как при таком освещении цвет предметов выглядит естественным, как при солнечном освещении. Для освещений внутри и снаружи помещений всё чаще применяют LED светодиоды, так как они являются экономичными и надёжными. Тогда белый свет можно получить следующими способами:

а) Синий светодиод с фосфором – это источник света, состоящий из синего InGaN светодиода, покрытого жёлтым фосфором. Синий свет от источника поглощается фосфором и переизлучается на широком спектре от красного до зелёного, тем самым генерируя белый свет. Изменение цветовой температуры излучаемого света достигается за счёт изменения толщины фосфорного покрытия.

б) RGB светодиод – это три светодиода (красный, синий и зелёный), при смешении света от которых, получается белый свет. Этот тип светодиодов подходит для Li-Fi систем, чем фосфорные светодиоды, так как последние значительно ограничены временем релаксации фосфора, что может снизить

скорость передачи данных (так как оказывается невозможно модулировать интенсивность такого светодиода с частотой выше нескольких МГц [3]). Кроме того, при использовании RGB светодиодов возможно применение цветовой манипуляции – метода модуляции с разделением каналов по длинам волн, что позволяет повысить скорость передачи данных [?] (раздел 3.2.4).

в) Лазерный диод (LD) – в 2011 году в лаборатории Sandia [?] предложили использовать комбинацию четырёх цветных лазерных диодов (красный, синий, зелёный, жёлтый) для получения белого света. Авторы получили очень яркий собранный пучок света, который хорошо подходит для освещения мест, требующих высокую освещенность. Так как лазерное излучение может нанести вред человеку (и из-за коллимированности плохо освещает большую площадь), авторы использовали рассеиватели. Полученное излучение уже не имеет некоторых лазерных характеристик, однако лазерные диоды являются значительно более эффективными, чем RGB светодиоды. В [?] авторы использовали три лазерных диода (рисунок 1.2) для создания источника света для VLC системы. Они смогли добиться скорости передачи данных до 5 Гб/с.

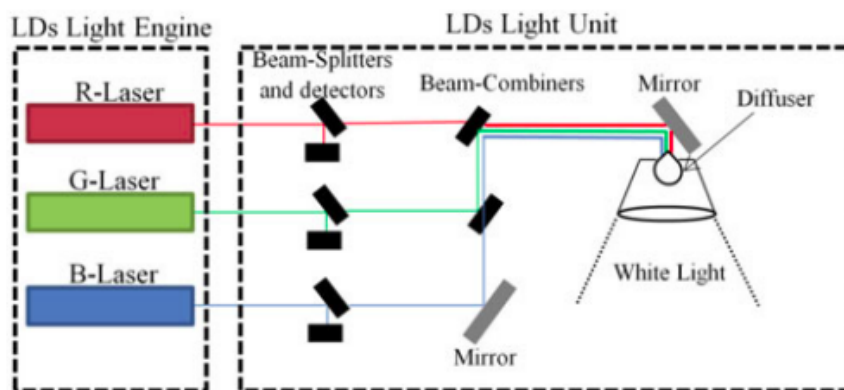


Рисунок 1.2 — Принципиальная схема источника в VLC системе в [?] с использованием лазерных диодов. В левой части схемы изображены три цветных лазера: красный, синий и зелёный соответственно; в правой части: разделители пучка и детекторы, устройства для совмещения лучей, зеркало, рассеиватель. На выходе получается свет белого цвета.

1.3 Li-Fi приёмник

В качестве приёмников в Li-Fi системах чаще всего используются

- а) фотодетекторы – фотодиоды,
- б) датчики изображения – камеры.

Фотодетектор – полупроводниковое устройство, которое генерирует ток при падении на него света. Современные коммерческие фотодетекторы могут детектировать с частотой до десятков МГц.

Самые простые фотодиоды основаны на PIN-структуре (области дырочной (P), электронной проводимости (N) и собственный полупроводник (I)) или на P-N переходе. Когда фотон с достаточной энергией попадает на диод, он создает электронно-дырочную пару – внутренний фотоэффект. Эти свободные носители двигаются в сторону P-N перехода. Скорость отклика фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем P-N перехода и ёмкостью P-N перехода.

Фотодиоды могут работать в двух режимах:

— фотогальванический (без внешнего напряжения). При таком режиме работы фототок вытекает из анода через короткое замыкание к катоду. Если цепь разомкнута или имеет импеданс нагрузки, который ограничивает течение фототока, то напряжение нарастает в направлении прямого смещения диода, то есть анод положителен по отношению к катоду. Если цепь замкнута или нагрузка отсутствует, ток смещения поглотит фототок полностью или частично [?];

— фотодиодный (с обратным внешним напряжением). В этом режиме работы катод положителен по отношению к аноду. Это уменьшает время отклика из-за увеличения ширины зоны обеднения, что снижает ёмкость перехода и повышает электрическое поле, из-за чего носители разделяются быстрее. Несмотря на то, что этот режим работы быстрее, фотодиодный режим работы повышает электрический шум из-за темнового тока и лавинных эффектов.

Характеристики фотодиода [?]:

а) чувствительность – мера чувствительности фотодиода к свету, которая определяется как отношение фототока I_P к мощности падающего света P на

конкретной длине волны:

$$R_{\lambda} = \frac{I_P}{P} \quad (1.1)$$

б) квантовая эффективность (QE) – отношение падающих фотонов, которые вызывают фототок, ко всем падающим фотонам. Она связана с чувствительностью следующим образом:

$$QE = \frac{R_{\lambda \text{ наблюдаемое}}}{R_{\lambda \text{ идеальное}}} = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda e} \quad (1.2)$$

Здесь h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны, e – заряд электрона;

в) вольт-амперная характеристика (ВАХ): ВАХ светодиода при отсутствии падающего света похожа на ВАХ обычного диода. Когда светодиод подвержен прямому смещению, сила тока возрастает экспоненциально. При обратном смещении появляется небольшой ток насыщения, который связан с темновым током следующим образом:

$$I_D = I_{SAT} \left(\exp \frac{eU}{k_B T} - 1 \right), \quad (1.3)$$

где I_D – темновой ток светодиода, I_{SAT} – обратный ток насыщения, e – заряд электрона, U – приложенное напряжение, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура (в кельвинах). Типичный вид ВАХ фотодиода показан на рис. 1.3. При освещении фотодиода светом, кривые ВАХ сдвигаются на фототок I_P . Тогда

$$I_{TOT} = I_{SAT} \left(\exp \frac{eU}{k_B T} - 1 \right) - I_P, \quad (1.4)$$

где I_{TOT} – общий ток;

г) шум. Он складывается из шума полупроводника и фотонного шума, не позволяет регистрировать сколь угодно малые сигналы.

Кроме фотодетекторов, возможно применение камер, которые уже есть в большинстве техники (смартфоны, планшеты, ноутбуки), что может упростить интеграцию этих устройств в Li-Fi систему. Кроме того, возможно применение Li-Fi для передачи информации в рамках интернета вещей [?]. Возможность использовать потребительские камеры появляется из-за того,

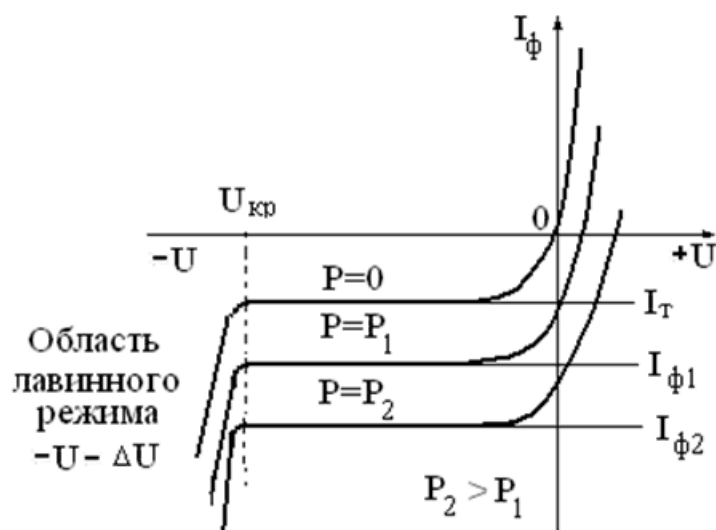


Рисунок 1.3 — ВАХ фотодиода в области прямого и обратного смещения. Здесь P_j – оптическая мощность падающего излучения, I – фототок, I_T – темновой ток, U – критическое напряжение, соответствующее критической напряженности E [?].

что камера представляет из себя матрицу фотодиодов. Важным отличием является их количество, что делает быстрый сбор и обработку информации с них затруднительным. Это связано со снимаемой камерой частотой кадров в секунду. Несмотря на значительные ограничения по пропускной способности, есть способы повышения скорости приёма информации, например – использование эффекта Rolling shutter [?]. Этот эффект заключается в следующем: так как количество пикселей в камере велико, считывание информации с них происходит построчно (или по столбцам). Если модулировать излучение с периодом, меньшим, чем время считывания одного столбца (строки), то в каждом столбце (строке) будет информация о передаче символа.

Тем не менее, использование фотодиодов остается более предпочтительным, так как с использованием их возможно достижение скорости передачи данных в несколько Гб/с [4].

2 ТИПЫ КОМПОНЕНТОВ

2.1 Фотодиоды

Выбор компонентов для определённого сценария использования определяется требованиями, выдвигаемыми к данной системе. Для фотодиода это может быть: интервал длин волн, которые он может детектировать, скорость отклика, фоточувствительность, сила темнового тока, тип корпуса. Это важно, так как существует значительное количество стандартных компонентов с различными стандартными корпусами, материалами полупроводника, характеристиками. Например, рассмотрим некоторые фотодиоды, представленные на сайте производителя Thorlabs (рисунок 1.1).

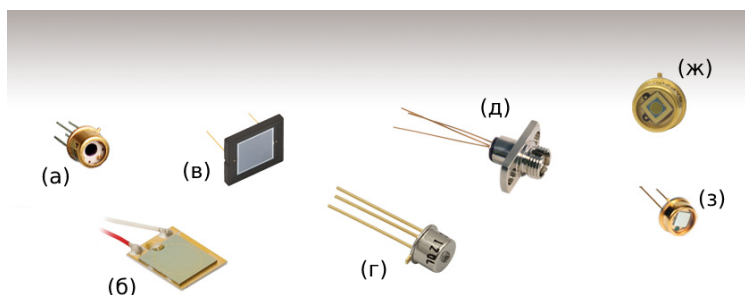


Рисунок 2.1 — Некоторые виды полупроводниковых PIN-фотодиодов, представленных на сайте производителя Thorlabs

а) DSD2 – двух-зонный фотодиод из Si/InGaAs, кремний находится над InGaAs, за счёт этого фотодиод имеет очень широкий интервал детектируемых длин волн (400-1100 нм для Si и 1000-1800 нм для InGaAs), размеры фотодиода: 5.07 мм² для Si, 1.77 мм² для InGaAs, тип корпуса TO-5;

б) FDG05 – фотодиод из Ge, интервал детектируемых длин волн 800-1800 нм, размеры фотодиода: 19.6 мм², выращен на керамической подложке, поэтому не имеет конкретного типа корпуса;

в) FDS10X10 – большой кремниевый фотодиод с интервалом детектируемых длин волн 340-1100 нм, с размерами фотодиода 100 мм². Аналогично предыдущему выращен на керамической подложке;

г) FGA01 – InGaAs фотодиод с высокой скоростью, типовым корпусом, интервал детектируемых длин волн 800–1700 нм, размеры фотодиода 0.01 мм², имеет стандартный корпус TO-46 и сферическую линзу;

д) FGA01FC – тот же предыдущий фотодиод, но с корпусом, позволяющим подключение к оптоволокну;

е) FGA21 – большой быстрый InGaAs фотодиод с интервалом детектируемых длин волн 800-1700 нм, размерами фотодиода 3.1 мм², тип корпуса TO-5;

ж) FDG03 – большой Ge фотодиод в стандартном корпусе TO-5, интервал детектируемых длин волн 800-1800 нм, размер фотодиода 7.1 мм².

2.2 Линзы

Аналогично и для линз существуют различные параметры, которые влияют на характеристики и места применения конкретных линз: габаритные размеры, тип линзы (собирающая/рассеивающая), материал линзы (коэффициент преломления влияет на фокусное расстояние линзы), радиусы кривизны поверхностей (аналогично влияют на фокусное расстояние), толщина линзы по оси, наличие просветляющего покрытия и его материал (наличие покрытия повышает коэффициент пропускания линзы для конкретных длин волн, определяемых материалом покрытия).

Так как для улучшения приёмной части системы есть смысл собирать лучи, падающие на приёмник, была выбрана собирающая линза. Большинство её параметров не имеют значения, так как единственными ограничениями оказываются прозрачный на выбранной длине волны материал и фокусное расстояние, позволяющее разместить активную область фотодиода в фокусе (активная область находится внутри корпуса). Остальные параметры влияют на фокусное расстояние, однако от него будут зависеть габаритные размеры всего приёмного устройства в Li-Fi системе. Исходя из этих ограничений, для моделирования была выбрана выпукло-плоская собирающая линза из оптического стекла K8, прозрачного в ближнем ИК диапазоне. Более подробное описание параметров линзы приведено в разделе 2.

3 МЕТОДЫ МОДУЛИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В VLC системах информация кодируется при помощи модуляции фазы, амплитуды и интенсивности. При рассмотрении различных схем модуляции необходимо не забывать об использовании системы в качестве освещения, так как некоторые параметры могут влиять на психо-физическое состояние человека. Некоторые такие параметры:

а) затемнение – для разных сценариев освещения необходимы различные уровни освещенности [?]. Если для освещения общественных пространств обычно достаточно света в интервале 30 – 100 лк, то для освещения офисов и жилых помещений нужно освещение 300 – 1000 лк. Современные светодиодные драйверы, управляющие питанием светодиодов, позволяют устанавливать любые необходимые уровни освещения в зависимости от сценария использования и требований по экономии энергии;

б) смягчение мерцания – так как модуляция интенсивности подразумевает высокочастотное изменение интенсивности источника света, необходимо выбирать такой интервал частот, который не воспринимается человеческим глазом. Было показано ([?]), что заметное мерцание освещения в течение продолжительного периода времени может привести к физиологическим последствиям у людей. Основной стандарт, описывающий системы VLC и Li-Fi – IEEE 802.15.7 [?] – рекомендует использовать частоту модулирования интенсивности не ниже 200 Гц.

Рассмотрим четыре типа модуляции, которые применяются в VLC:

- а) On-Off Keying (OOK);
- б) импульсная модуляция (ИМ);
- в) мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов;
- г) цветовая манипуляция (CSM);

3.1 On-Off Keying

Самым простым методом модуляции излучения является On-Off Keying (OOK). Биты данных «1» и «0» здесь кодируются включенным и выключенным состоянием светодиода. На самом деле, не обязательно полно-

стью выключать светодиод, достаточно лишь уменьшения интенсивности его излучения до некоего порогового уровня. Такой тип модуляции часто применяется в волоконных коммуникациях. При использовании такой модуляции с синим фосфорным светодиодом, скорость передачи данных будет значительно ограничена (из-за времени релаксации энергетических уровней фосфора – частота модуляции может быть не выше нескольких МГц [?]). Если же использовать ООК, при котором светодиод не выключается, а его интенсивности уменьшается до порогового значения, как было описано выше, то возможно получение пропускной способности порядка десятков Мб/с [?]. Если же использовать синий фильтр, чтобы убрать из сигнала свет жёлтого фосфора, то можно повысить пропускную способность до 40 Мб/с [?]. Аналогично в [?, ?] было предложено комбинирование синего фильтра и аналогового выравнивания на приёмнике для достижения скорости передачи данных 100 и 125 Мб/с соответственно. Если использовать лавинный фотодиод (а не р-і-п фотодиод), то можно ещё больше повысить пропускную способность [?]. Это связано с тем, что лавинный светодиод обладает более высокой чувствительностью и может регистрировать малые световые мощности. В таком случае пропускная способность системы возрастает до 230 Мб/с [?].

Эта схема модуляции может быть использована и с RGB светодиодом, который имеет более быстрый отклик. В [?] было продемонстрирована схема для передачи данных с RGB светодиодом, ООК схемой модуляции и р-і-п фотодиодом в качестве фотоприёмника. Достигнутая скорость передачи данных составила 477 Мб/с.

3.2 Методы импульсной модуляции

Несмотря на то, что ООК имеет ряд преимуществ (простота и лёгкость реализации), оно имеет значительное ограничение – низкая скорость передачи данных. Поэтому были разработаны альтернативные методы модуляции, которые основаны на длительности (PWM) и положении импульса (PPM).

3.2.1 Модуляция длительности импульса

Модуляция длительности импульса (PWM) является эффективным методом модуляции с помощью затемнения. Импульсы несут кодированный сигнал, а длительность импульсов определяет уровень освещенности. Из-за этого возможно изменять уровень освещенности без изменения интенсивности импульсов, так как сигнал кодируется длительностью импульса, во время которого светодиод работает на постоянной мощности. К минусам PWM относится достаточно низкая скорость передачи информации (4.8 Кб/с в [?]).

3.2.2 Фазово-амплитудная модуляция

Фазово-амплитудная модуляция (PPM) основана на фазе импульса. В этой схеме модуляции длительность символа разделена на несколько интервалов одинаковой длительности, в одном из которых находится импульс. Тогда кодирование информации происходит с помощью положения импульса в конкретном интервале. Так как этот метод модуляции является достаточно простым, он был одним из первых, применённых в VLC системах – [?, ?]. Существуют различные вариации этой схемы, например для передачи данных в условиях плохого соединения можно использовать PPM с адаптивной частотой передачи и повторением сигналов [?].

Так как PPM предполагает передачу только одного импульса за временной интервал, это приводит к низкой скорости передачи данных и спектральной эффективности (спектральная эффективность – это скорость передачи данных, с которой возможно передавать информацию через конкретную полосу пропускания, характеризует эффективность использования частотного диапазона). Чтобы преодолеть эти проблемы были предложены альтернативные варианты PPM – перекрывающиеся фазово-амплитудные модуляции (OPPM), в которых, как следует из названия, возможно передавать несколько импульсов за временной интервал [?]. Кроме того, возможно и перекрывание нескольких символов (смотри рисунок 3.1). Использование OPPM позволяет иметь более детальный контроль над уровнем освещения, решает проблему низкой спектральной эффективности и скорости передачи данных по сравнению с ООК и PPM [?].

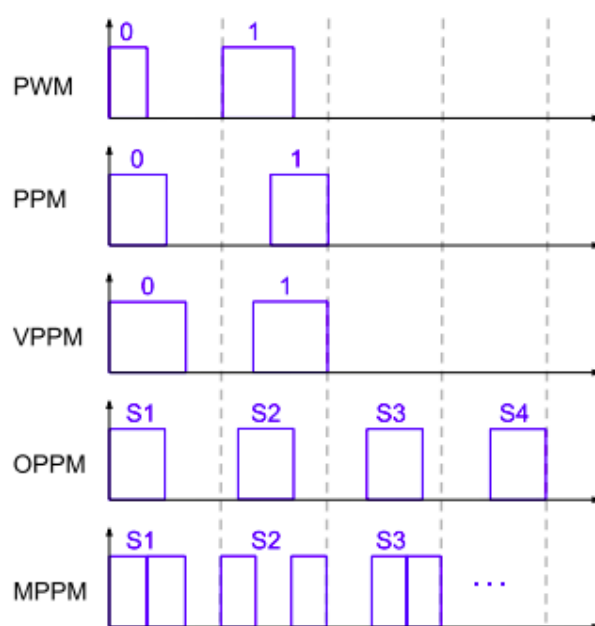


Рисунок 3.1 — Схематическая диаграмма, показывающая различия между модуляцией длительности импульса (PWM), фазово-амплитудной модуляцией (PPM), переменной фазово-амплитудной модуляцией (VPPM), перекрывающейся фазово-амплитудной модуляцией (OPPM) и многоимпульсной фазово-амплитудной модуляцией (MPPM). S_n обозначает n -ный символ. [?]

В [?] была предложена другая схема, основанная на PPM, которая аналогично OPPM даёт возможность передавать несколько импульсов за интервал длительности символа. В отличие от OPPM, однако, здесь импульс не обязательно должен быть непрерывным (смотри рисунок 3.1). Это позволяет повысить спектральную эффективность по сравнению с OPPM [?].

В самом стандарте, описывающем системы VLC и Li-Fi, IEEE 802.15.7 [?] предлагается альтернативная схема модуляции – переменная фазово-амплитудная модуляция (VPPM), которая имеет ряд общих черт с PPM и PWM. Как и в первой, данные кодируются фазой импульса, в то время как возможно изменение длительности импульса при необходимости. В результате этого, VPPM имеет высокую надёжность и простоту, и позволяет детально варьировать уровень освещения, как и в PWM 3.2.1.

3.2.3 Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM)

Преимущество мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), которое широко применяется в РЧ-коммуникациях, является отсутствие межсимвольной интерференции, которая может появляться в описанных выше методах модуляции из-за нелинейности частотного отклика каналов связи. Было предложено использовать OFDM и для систем передачи данных по видимому свету [?]. Особенностью OFDM является то, что канал разделяется на несколько ортогональных несущих, данные по которым передаются параллельно потоками, модулируемыми по несущим. Проблема применения OFDM для беспроводных систем связи по видимому свету заключается в том, что OFDM генерирует комплексные биполярные сигналы, которые необходимо сконвертировать в действительные сигналы.

Другой проблемой OFDM является нелинейность отношения приложенного тока к интенсивности света LED [?]. Это выражается в отношении пиковой к средней мощности и было изучено в [?, ?]. Там авторы предлагают в качестве решения использование светодиода в небольшом интервале мощности, на котором это отношение квазилинейное.

Несмотря на эти недостатки, OFDM имеет высокие перспективы, и было показано, что возможно достижение скорости передачи до нескольких Гб/с с использованием одного светодиода [3, ?].

3.2.4 Цветовая манипуляция (CSK)

В стандарте IEEE 802.15.7 [?] описывается ещё один тип модуляции, который был разработан специально для использования в беспроводных системах связи по видимому свету – цветовая манипуляция (CSK). Суть этого метода заключается в отдельном модулировании трёх цветовых компонент RGB светодиода.

CSK модуляция основана на модели цветового пространства CIE 1931 [?] (рисунок 3.2, таблица 3.1), на которой всем видимым человеческим

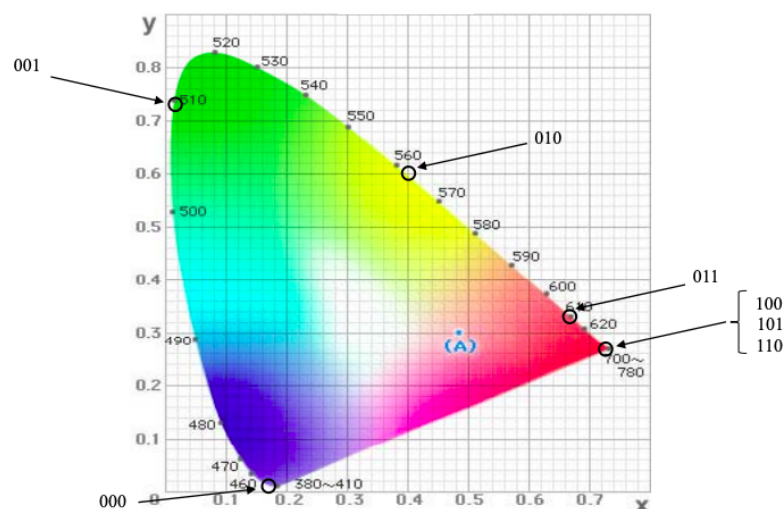


Рисунок 3.2 — Цветовое пространство CIE 1931 [?]

глазом цветам присвоена пара (x,y) координат. Все это пространство разделено на семь полос, представленных в таблице 3.1

Таблица 3.1 — Семь полос, используемых в CSK, их коды, центральные длины волн и координаты на цветовом пространстве [?]

Полоса (нм)	Код	Центральная длина волны (нм)	(x,y)
380 – 478	(000)	429	(0.169, 0.007)
478 – 540	(001)	509	(0.011, 0.733)
540 – 588	(010)	564	(0.402, 0.597)
588 – 633	(011)	611	(0.669, 0.331)
633 – 679	(100)	656	(0.729, 0.271)
679 – 726	(101)	703	(0.734, 0.265)
726 – 780	(110)	754	(0.734, 0.265)

Суть алгоритма кодирования информации заключается в следующем [?]:

а) выбираются три точки в цветовом пространстве, которые соответствуют цветам RGB светодиода – получается треугольник;

б) в зависимости от выбранной схемы кодирования (4-CSK, 8-CSK, 16-CSK – четыре, восемь и шестнадцать символов, соответственно) определяются координаты символов на плоскости. По сути это является задачей на оптимизацию, так как необходимо выбрать координаты так, чтобы расстоя-

ние между ними было наибольшим (это необходимо для минимизации интерференции между символами);

в) по координатам символов вычисляется яркость компонент RGB светодиода:

$$\begin{aligned}x_s &= P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \\y_s &= P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \\P_i + P_j + P_k &= 1\end{aligned}\tag{3.1}$$

Здесь (P_i, P_j, P_k) – яркости компонент светодиода, (x_s, y_s) – цветовые координаты символа на цветовой плоскости (рисунок 3.2), (x_{ijk}, y_{ijk}) – координаты центральных длин волн компонент светодиода на цветовой плоскости.

Для большего уменьшения межсимвольной интерференции возможно использовать светодиоды с четырьмя цветовыми компонентами (циан, синий, желтый, красный), так как тогда форма области на цветовой диаграмме будет четырёхугольником (а не треугольником, как в случае RGB светодиода), что позволит расположить символы дальше друг от друга [?].

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Базовая система

В качестве источника излучения был выбран ИК лазерный диод FPL1055T с длиной волны излучения 1550 нм, мощностью излучения в импульсном режиме 300 мВт, поперечной расходимостью 28° и боковой расходимостью 15° [9]. Выбранный фотодиод – FDGA05 с пиковой длиной волны 1550 нм (регистрируемый диапазон длин волн 800-1700 нм), фоточувствительностью 0.95 А/Вт, площадью активной области 0.196 мм^2 и материалом сенсора InGaAs [10].

Для моделирования оптической системы использовался пакет Zemax OpticStudio 21.1.2. Рассмотрим задание параметров компонентов системы (рисунки 2.1):

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	Analysis Ra	Power(Watts)	Wavelength	Color #	Asigmatism	X-Divergence	X-SuperGauss	Y-Divergence	Y-SuperGauss
1	Source Diode	FPL1055T	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	SE+06	0.300	0	0	0.000	12.740	1.000	22.781	1.000
2	Annulus	FDGA05	0	0	0.000	0.000	2000.000	0.000	0.000	0.000	2.300	2.300	1.250	1.250						
3	Cylinder Pipe	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.300	4.800	2.300							
4	Detector Surface	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0	0

Рисунок 4.1 — Задание параметров оптической системы в Zemax

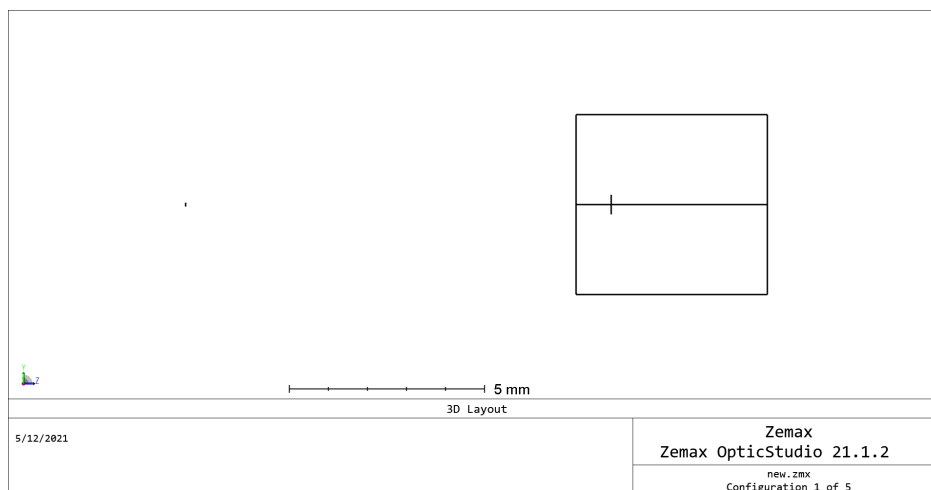


Рисунок 4.2 — Вид системы сбоку; слева – площадка лазерного диода, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 10 мм

Первые 11 колонок (до колонки «# Layout Rays») универсальны для всех объектов в Zemax: тип объекта, комментарий, референтный объект, нахождение внутри другого объекта, X, Y и Z координаты, наклон вокруг осей

X, Y и Z, материал объекта (где применимо). Далее идут специфические для объекта параметры:

Для лазерного диода: количество лучей для рендеринга и для расчётов (выбираются произвольно), мощность источника (выбрана в соответствии с [9]), номер длины волны (задаётся список используемых длин волн, задана только одна – 1550 нм, поэтому в ячейке стоит ноль – выбор любой длины волны из списка), цвет лучей на рендере, астигматизм (расстояние, на которое смещено распределение излучения в плоскости XZ), расходимость α_x для направления OX, супер-гауссов коэффициент G_x в направлении OX, расходимость α_y и супер-гауссов коэффициент G_y для направления OY.

Супер-гауссов коэффициент показывает отличие профиля интенсивности данного пучка от профиля интенсивности Гауссова пучка – чем он больше, тем ближе профиль интенсивности излучения к прямоугольному профилю [11]. Для обоих направлений был выбран супер-гауссов коэффициент $G_{x,y} = 1$ (Гауссово распределение интенсивности). Следуя документации Zemax, можно рассчитать $\alpha_{x,y}$ следующим образом:

$$\alpha_{x,y} = \frac{\theta_{\text{fwhm}}}{\sqrt{2 \ln(2)}},$$

где θ_{fwhm} – угол расходимости из [9].

Два следующих объекта формируют корпус фотодиода: круг с отверстием и трубка. Для круга с отверстием задаются радиусы отверстия и самого круга по большой и малой полуосям. Их значения соответствуют размерам реального лазерного диода [10]. Его положение задаётся относительно лазерного диода. Для трубки задаются радиусы начала и конца, длина. Радиусы равны и взяты из документации к фотодиоду, длина взята произвольной, положение задаётся относительно круга с отверстием. Этого достаточно для данного моделирования, так как стекло, закрывающее активную область от физического воздействия влияет пренебрежимо слабо на ход лучей и оптическую мощность на приёмнике, а всё, что находится за активной областью не влияет на модель вообще. Виды фотодиода приведены на рисунке 2.3.

Для фотодиода заданы размеры апертуры (взяты из документации), количество угловых и радиальных зон оставлены по умолчанию и необходимы для расчётов в симуляции. Положение фотодиода задаётся относительно

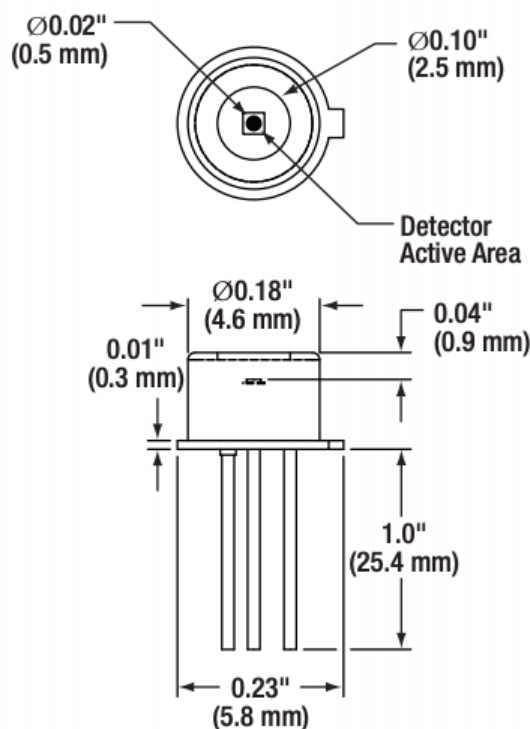


Рисунок 4.3 — Виды сверху и спереди фотодиода FDGA05 [10]

круга с отверстием и соответствует положению фотодиода в корпусе. Вид системы сбоку представлен на рисунке 2.2.

Для анализа системы зададим $5 \cdot 10^6$ лучей, проведём трассировку лучей и получим оптическую мощность, полученную на фотодиоде. Анализ будем производить для различных расстояний между лазерным диодом и фотоприёмником. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.1. Построим график зависимости оптической мощности от расстояния (рисунок 2.4).

Эту зависимость можно аппроксимировать функцией $f(x) = \frac{1}{R^2}$, так как зависимость оптической мощности от расстояния подчиняется закону обратных квадратов. Лучшим образом для этого подходит функция $f(x) = \frac{0.615}{(x+1.639)^2} - 2.049 \cdot 10^{-4}$ (показана на графике пунктирной зелёной линией, результаты симуляции показаны синими точками).

4.2 Базовая система с собирающей линзой

Далее добавим в систему собирающую сферическую линзу, конфигурация системы приведена на рисунке 2.5.

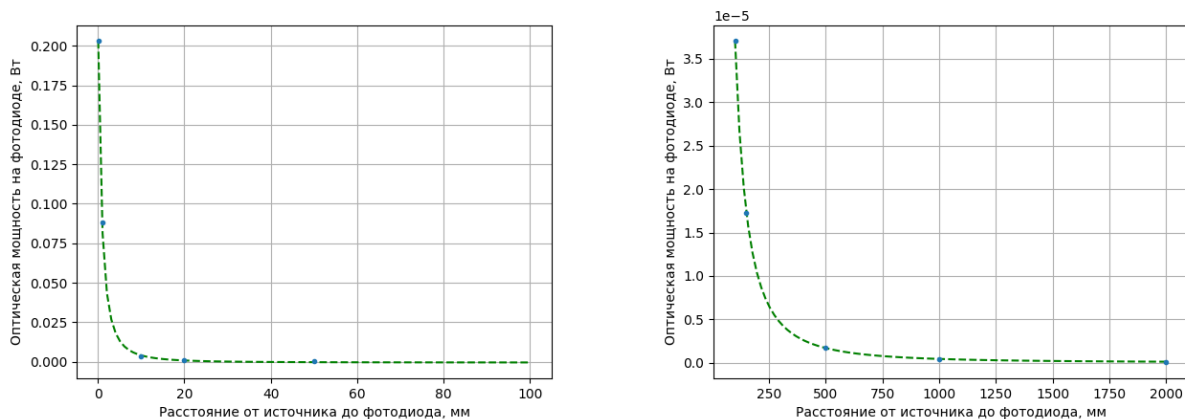


Рисунок 4.4 — Зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между лазерным диодом и фотодиодом: результаты симуляции показаны синими точками, аппроксимирующая функция показана зелёной пунктирной линией

	Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Radius 1	Conic 1	Clear 1	Edge 1	Thickness	Radius 2	Conic 2	Clear 2	Edge 2
1	Source Diode	FPL1055T	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	10	5E+06	0.300	0	0	0.000	12.740	1.000	23.781
2	Annulus	FDGA05	0	0	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	2.300	2.300	1.250	1.250					
3	Cylinder Pipe	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	2.300	4.900	2.300						
4	Standard Lens		2	0	0.000	0.000	-15.860	0.000	0.000	0.000	LZ_K8	8.500	0.000	6.500	6.500	3.300	0.000	0.000	6.500	6.500
5	Detector Surface	FDGA05	2	0	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0

Рисунок 4.5 — Задание параметров оптической системы с линзой в Zemax

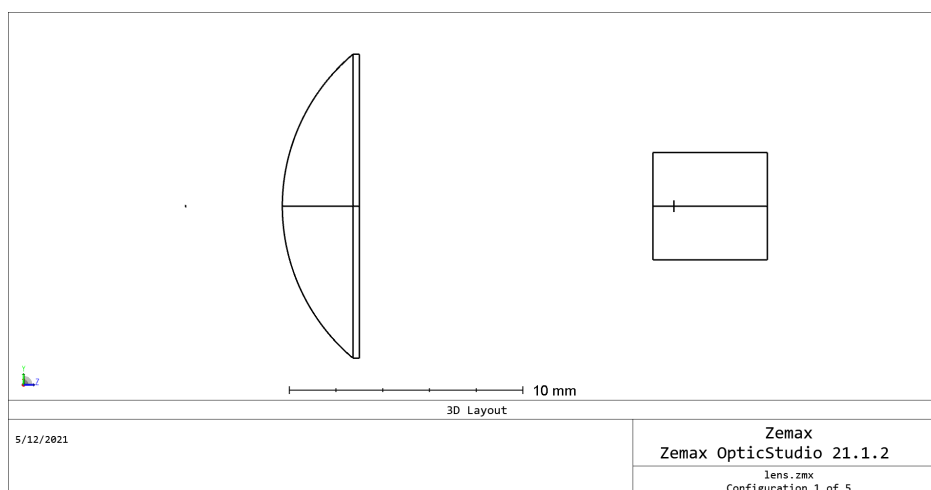


Рисунок 4.6 — Вид системы сбоку; слева – площадка лазерного диода, по середине – собирающая линза, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 20 мм

Рассмотрим параметры линзы: зададим положение линзы относительно круга с отверстием, аналогично положению фотодиода. Материал линзы – оптическое стекло K8 с показателем преломления $n = 1.507$ на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Линза плоско-выпуклая с радиусом кривизны поверхности

$R = 8.5$ мм, толщиной линзы $d = 3.3$ мм. Очевидно, что фокусной расстояние этой линзы (по формуле 2.1) $f = 16.76$ мм.

$$\frac{1}{f} = \frac{n - 1}{R} \quad (4.1)$$

Тогда для лучшей фокусировки лучей необходимо поместить фотодиод в фокус линзы, то есть необходимо поместить линзу на расстоянии 15.86 мм от корпуса фотодиода (фотодиод находится на расстоянии 0.9 мм от поверхности корпуса) – рисунок 2.5. Вид системы с боку представлен на рисунке 2.6. Аналогично двум предыдущим случаям, будем менять расположение линзы относительно фотодиода и наблюдать за изменением оптической мощности на приёмнике. Все результаты симуляции приведены в приложении А в таблице А.2. График результатов приведен на рисунке 2.7.

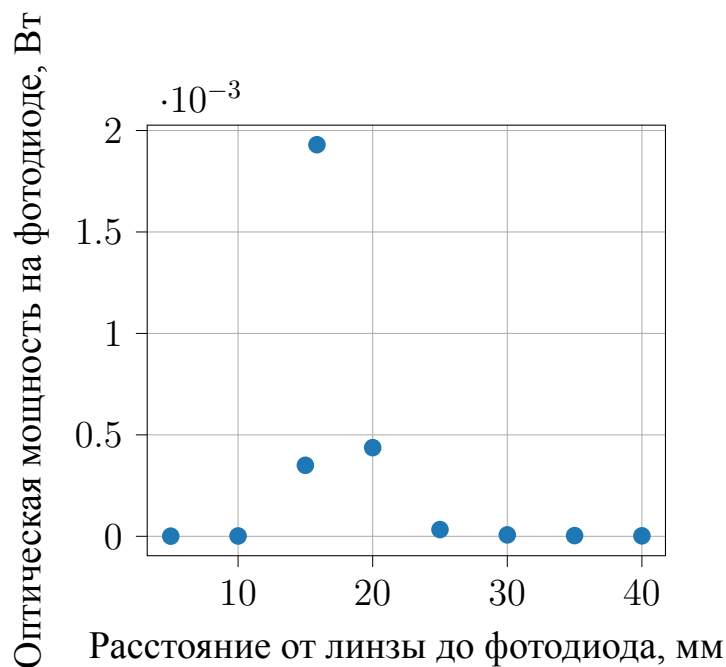


Рисунок 4.7 — Зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между собирающей линзой и фотодиодом: результаты симуляции показаны синими точками

По графику видно, что действительно наибольшая оптическая мощность на фотодиоде наблюдается при нахождении фотодиода в фокусе линзы.

4.3 Исследование диаграммы направленности приёмника

Для более полного представления о характеристиках фотодиода составим нормированный график оптической мощности в зависимости от направления источника излучения. Для этого заменим лазерный диод на плоский прямоугольный источник (Source Rectangle в Zemax) – рисунок 2.8, вид системы с боку приведён на рисунке 2.9.

	Object Type	Mount Z	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavelength	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source Distan	Cosine Expon	Gauss Gx	Gauss Gy
1	Source Rectangle	0.00		100	5E+06	1000.000	0	0	6.500	6.500	0.000	0.000	1.000E+20	1.000E+20
2	Annulus	0.00	ABSO...	2.300	2.300	1.250	1.250							
3	Cylinder Pipe	0.00	ABSO...	2.300	4.900	2.300								
4	Standard Lens	0.00	LZ_K8	8.500	0.000	6.500	6.500	3.300	0.000	0.000	6.500	6.500		
5	Detector Surface	0.00		0.000	0.000	0.250	0.000	16	8	0	0	0	0	0.000

Рисунок 4.8 — Задание параметров оптической системы с плоским прямоугольным источником в Zemax

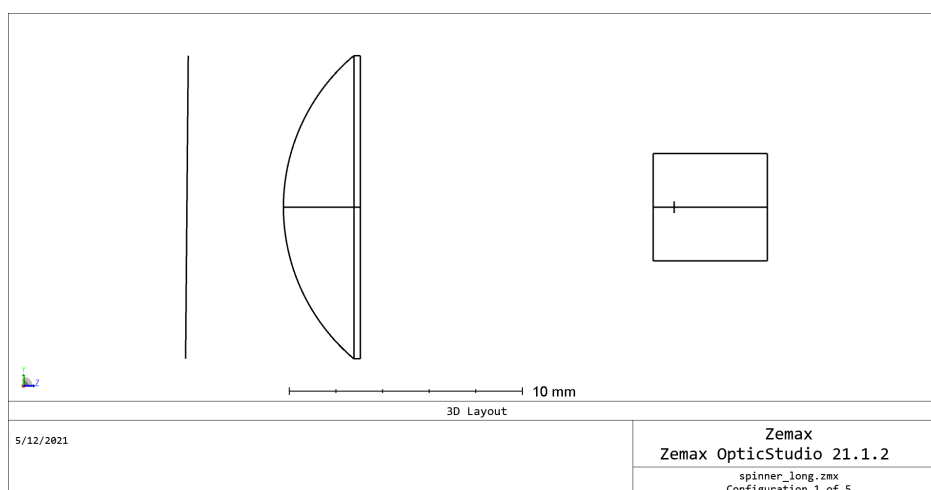


Рисунок 4.9 — Вид системы сбоку; слева – площадка плоского источника излучения, справа – фотодиод в корпусе; расстояние между лазерным диодом и корпусом фотодиода 20 мм

Параметры задаются аналогично параметрам лазерного диода в разделе 2.1. Зададим размеры источника 13x13 мм (квадрат со стороной, равной диаметру линзы). Для создания параллельного пучка излучения зададим супер-гауссовы параметры $G_{x,y}$: чем больше эти параметры, тем более узким выходит пучок. Были выбраны значения $G_{x,y} = 10^{20}$, в результате чего пучок лучей оказывается достаточно параллельным для выбранного расстояния [12]:

$$I(l, m) \approx I_0 \exp(-G_x l^2 - G_y m^2), G_x = G_y \gg l, m \Rightarrow I(l, m) \approx I_0 \quad (4.2)$$

где l и m – направляющие косинусы вдоль OX и OY соответственно. Величина мощности не важна, так как будем нормировать графики по максимальному значению. Будем вращать источник вокруг OX (в одну сторону, так как система полностью симметрична относительно плоскости ZOX ; вращаем с шагом в 1°) и трассировать лучи. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.3. Построим график зависимости оптической мощности от угла поворота источника (рисунок 2.10).

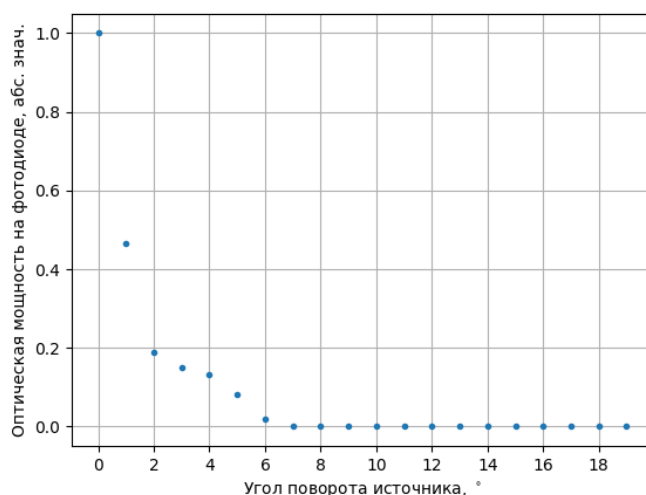


Рисунок 4.10 — График зависимости нормированной оптической мощности на приёмнике от угла поворота источника (система с линзой)

Аналогично проведём моделирование системы без линзы. Результаты всех симуляций приведены в приложении А в таблице А.4, график зависимости оптической мощности от угла поворота источника представлен на рисунке 2.11.

По результатам изменения параметров видно, что самая высокая оптическая мощность достигается при наименьшем расстоянии между фотодиодом и лазерным диодом или при установке собирающей линзы на расстоянии от фотодиода, равном фокусному. Однако даже в наилучших случаях оптическая мощность значительно меньше, чем мощность излучения источника (0.203 Вт и 0.00193 Вт соответственно, против 0.3 Вт источника). Очевидно,

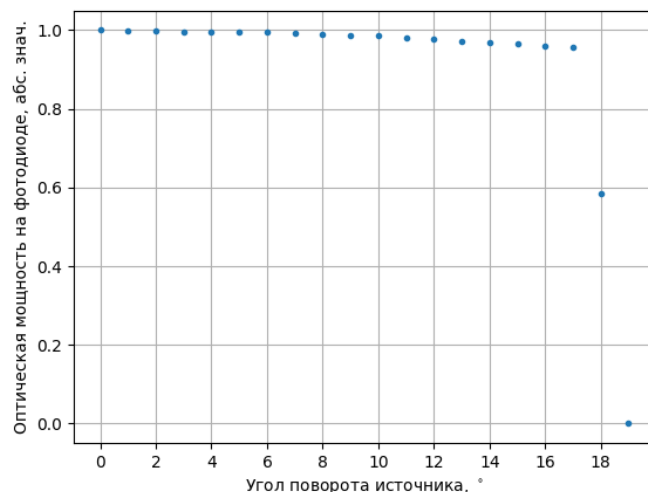


Рисунок 4.11 — График зависимости нормированной оптической мощности на приёмнике от угла поворота источника (система без линзы)

что необходима дополнительная оптическая система для коллимации лучей источника и для фокусировки лучей у приёмника для уменьшения оптических потерь системы и для создания системы, в которой возможно передавать информацию.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Как уже было сказано в предыдущем разделе 2, в качестве приёмника был выбран фотодиод FDGA05. Рассчитаем пропускную способность f_{BW} этого фотодиода по данным производителя [10]:

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi R_L C_j}, \quad (5.1)$$

где $R_L = 50$ Ом – сопротивление нагрузки, $C_j = 10$ пФ = 10^{-11} Ф – ёмкость фотодиода. Тогда $f_{BW} = 3.1831 \cdot 10^8$ Гц = 318.31 МГц.

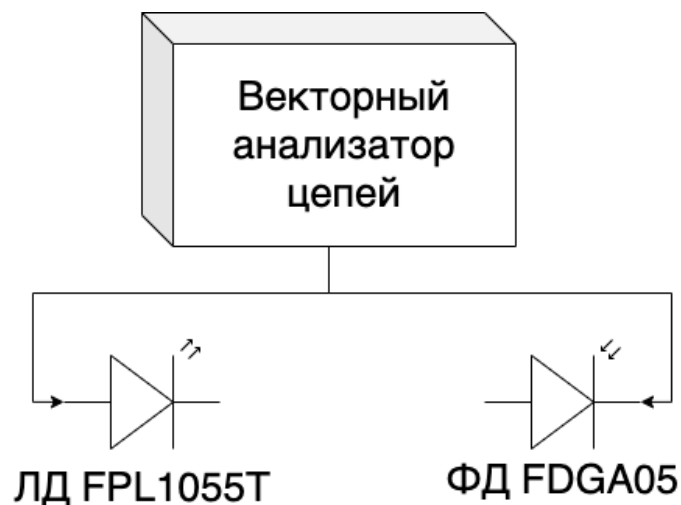


Рисунок 5.1 — Схема экспериментальной установки, использованной для проведения измерения ёмкости фотодиода FDGA05. Здесь ЛД и ФД – лазерный и фото диоды соответственно



Рисунок 5.2 — Фотодиод FDGA05, распаянный на плате с SMA разъёмом, вид спереди

Экспериментально подтвердим это значение. Для этого соберём экспериментальную установку, состоящую из фотодиода FDGA05 [10] и лазерного диода FPL1055T [9]. Оба компонента распаяны на платы (рисунки 3.2, 3.3) для подключения к векторному анализатору цепей Rohde Schwarz



Рисунок 5.3 — Фотодиод FDGA05 (слева) и лазерный диод FPL1055T (справа), распаянные на платах с SMA разъёмом, вид сверху

ZVA 40 через SMA разъем (собранный установка аналогична установке представлена на рисунке 3.4: на ней показаны лазерный диод FPL1055T слева и фотодиод, использованный в работе [13], схематично экспериментально показана на рисунке 3.1).



Рисунок 5.4 — Собранный экспериментальная установка с лазерным диодом FPL1055T и фотодиодом, использованным в работе [13]

К первому порту векторного анализатора цепей подключен лазерный диод, ко второму – фотодиод. Для расчёта пропускной способности необходимо измерить ёмкость фотодиода экспериментально. Сделаем это при помощи измерения комплексного коэффициента отражения векторным анализатором (полученная диаграмма Смита приведена на рисунке 3.5).

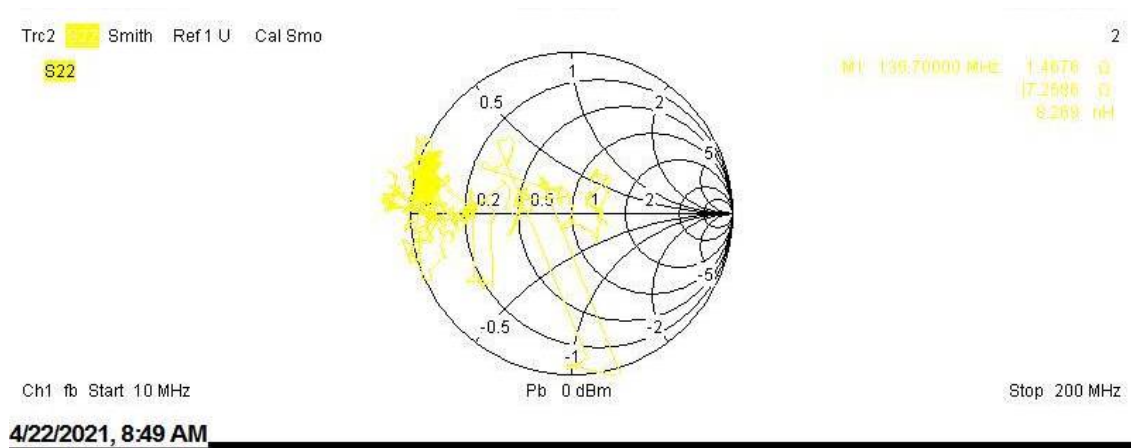


Рисунок 5.5 — Диаграмма Смита для фотодиода

По измеренным данным не удаётся демодулировать сигнал из-за большого коэффициента отражения. Это связано с тем, что в сверх высокочастотный тракт ничего не проходит, так как нет согласования фотодиода по высоким частотам. С точки зрения работы в высокочастотном тракте, фотодиод представляет собой рассогласованную по сопротивлению нагрузку, поэтому сигнал переотражается и без схемы согласования не удаётся детектировать высокочастотный сигнал и исследовать амплитудно-частотную характеристику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выпускной квалификационной работы являются модель оптической системы в программе Zemax OpticStudio. В ходе работы был проведён обзор существующей коммерчески доступной компонентной базы, на примере производителя Thorlabs, выбран фотодетектор, построена модель оптической системы с ним, проведено исследование зависимости оптической мощности на нём в зависимости от различных параметров системы, был проведён эксперимент с целью рассчитать ширину полосы пропускания фотодиода.

В ходе работы было показано, что возможно создание Li-Fi сети с использованием стандартных компонентов, что позволит увеличить скорость внедрения и популяризации технологии, инфракрасной длины волны для восходящего сигнала, что является безопасным для человека, не мешает в освещении и позволяет увеличить мощность источника излучения для повышения качества передаваемого сигнала и скорости передачи информации. Была построена модель оптической системы, которая позволяет исследовать зависимость оптической мощности, улавливаемой фоточувствительной площадкой фотоприёмника в зависимости от различных параметров системы – углы расходимости источника, угол поворота источника, расстояние между источником и приёмником, мощность источника.

В дальнейшем работу можно продолжить: при использовании схемы согласования, возможно измерить ёмкость фотодиода и рассчитать его полосу пропускания, исследовать возможность и целесообразность использования светофильтров и просветляющего покрытия на оптике (фокусирующая линза, защитное стекло фотоприёмника) для улучшения качества связи или уменьшения необходимой мощности излучения источника.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Study on the future UK spectrum demand for terrestrial mobile broadband applications : Rep. / Ofcom : 2013. — Jun.
2. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 : Rep. / Cisco : 2019. — Feb. — Access mode: <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).
3. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation / A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini et al. // IEEE Photonics Journal. — 2012. — Oct. — Vol. 4, no. 5. — P. 1465–1473.
4. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED / G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury et al. // Optics Express. — 2012. — Dec. — Vol. 20, no. 26. — P. B501. — Access mode: <https://doi.org/10.1364/oe.20.00b501>.
5. Azhar A., Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications // IEEE Photonics Technology Letters. — 2013. — Jan. — Vol. 31, no. 6. — P. 918–929.
6. Dimitrov S., Haas H. Information rate of ofdm-based optical wireless communication systems with nonlinear distortion // Journal of Lightwave Technology. — 2013. — Vol. 31, no. 6. — P. 918–929.
7. VLC: Beyond Point-to-Point Communication / B. Harald, S. Nikola, T. Dobroslav et al. // IEEE Communications Magazine. — 2014.
8. What is LiFi? / Harald Haas, Liang Yin, Yunlu Wang, Cheng Chen // J. Lightwave Technol. — 2016. — Mar. — Vol. 34, no. 6. — P. 1533–1544. — Access mode: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-34-6-1533>.
9. Haas Harald. Wireless data from every light bulb. — 2011. — Jul. — Access mode: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb (online; accessed: May 31, 2021).

10. IEEE 802.15.7-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications. — 2018. — Access mode: https://standards.ieee.org/standard/802_15_7-2018.html (online; accessed: 2021-03-21).
11. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization / H. Le Minh, D. O'Brien, G. Faulkner et al. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2008. — Vol. 20, no. 14.
12. Komine T., Haruyama S., Nakagawa M. Performance evaluation of narrowband OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication // 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing. — 2006. — P. 1–6.
13. Komine T., Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights // IEEE Trans. Consum. Electron. — 2004. — Vol. 50, no. 1. — P. 100–107.
14. Bian Rui, Tavakkolnia Iman, Haas Harald. 15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — May. — Vol. 37, no. 10. — P. 2418–2424. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2906464>.
15. Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality / A. Neumann, J. J. Wierer, W. Davis et al. // Optics Express. — 2011. — Jul. — Vol. 19, no. S4. — P. A982. — Access mode: <https://doi.org/10.1364/oe.19.00a982>.
16. Hussein Ahmed Taha, Elmirghani Jaafar M. H. Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment // Journal of Lightwave Technology. — 2015. — Aug. — Vol. 33, no. 15. — P. 3293–3307. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/jlt.2015.2439051>.
17. Haberlin Heinrich. Photovoltaics system design and practice. — Wiley, 2014. — ISBN: 9781119978381. — Access mode: <http://rbdigital.oneclickdigital.com>.
18. Photodiode Characteristics and Applications : Rep. / OSI Optoelectronics : 2006. — Access mode: <http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/>

an-photodiode-parameters-characteristics.pdf (online; accessed: May 31, 2021).

19. Нойкин Ю.М., Махно П.В. Физические основы оптической связи. — ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет 2011.

20. Decoding methods in LED-to-smartphone bidirectional communication for the IoT / Alexis Duquel, Razvan Stanica, Herve Rivano, Adrien Desportes // 2018 Global LIFI Congress (GLC). — IEEE, 2018. — Feb. — Access mode: <https://doi.org/10.23919/glc.2018.8319118>.

21. Demonstration of A Visible Light Receiver Using Rolling-Shutter Smartphone Camera / Tuan-Kiet TRAN, Huu-Thuan HUYNH, Duc-Phuc NGUYEN et al. // 2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). — IEEE, 2018. — Oct. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/atc.2018.8587521>.

22. Artūras Žukauskas, Michael Shur, Remis Gaska. Introduction to solid-state lighting. — New York : J. Wiley, 2002. — ISBN: 9780471215745.

23. Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources / S. M. Berman, D. S. Greehouse, I. L. Bailey et al. // Optom. Vis. Sci. — 1991. — Aug. — Vol. 68, no. 8. — P. 645–662.

24. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs / J. Grubor, S. C. J. Lee, K.-D. Langer et al. // 33rd Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun.—Post-Deadline Papers. — 2007. — Sep. — P. 1–2.

25. Park S. Information broadcasting system based on visible light sign-board // Wireless Opt. Commun. — 2007. — P. 311–313.

26. Minh H. L. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2008. — Jul. — Vol. 20, no. 14. — P. 1243–1245.

27. Vucic J. 125 Mbit/s over 5 m wireless distance by use of OOK-Modulated phosphorescent white LEDs // 35th ECOC. — 2009. — Sep. — P. 1–2.

28. Vucic J. 230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs // Conf. OFC/NFOEC. — 2010. — Mar. — P. 1–3.

29. Fujimoto N., Mochizuki H. 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single commercially available visible LED and a practical LED driver with a pre-emphasis circuit // Optical Fiber Communication Conf./Nat. Fiber Optic Engineers Conf. — Anaheim, CA, USA, 2013. — Mar.
30. Sugiyama H., Haruyama S., Nakagawa M. Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems // 3rd ICWMC. — 2007. — Mar. — P. 78.
31. Georgiades C. Modulation and coding for throughput-efficient optical systems // IEEE Trans. Inf. Theory. — 1994. — Sep. — Vol. 40, no. 5. — P. 1313–1326.
32. shan Shiu D., Kahn J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication // IEEE Trans. Commun. — 1999. — Aug. — Vol. 47, no. 8.
33. Wireless infrared transmission: How to reach all office space / F. Gfeller, W. Hirt, M. de Lange, B. Weiss // Mobile Technol. Hum. Race / Ed. by IEEE 46th Veh. Technol. Conf. — Vol. 3. — 1996. — Apr. — P. 1535–1539.
34. Bai Bo, Xu Zhengyuan, Fan Yangyu. Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM // The 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010). — IEEE, 2010. — May. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/wocc.2010.5510410>.
35. Pathak P. H. et al. “Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. // IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS. — 2015. — Vol. 17, no. 4. — P. 2047–2077.
36. Sugiyama H., Nosu K. MPPM: a method for improving the band-utilization efficiency in optical PPM // Journal of Lightwave Technology. — 1989. — Mar. — Vol. 7, no. 3. — P. 465–472. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/50.16882>.
37. Visible light communication using OFDM / M. Afgani, H. Haas, H. Elgala, D. Knipp // 2nd Int. Conf. / Ed. by TRIDENTCOM. — 2006. — P. 129–134.

38. VLC: Beyond point-to-point communication / H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev et al. // IEEE Commun. Mag. — 2014. — Jul. — Vol. 52, no. 7. — P. 98–105.
39. Elgala Hany, Mesleh Raed, Haas Harald. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM // 2009 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. — Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. — Apr. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/wocn.2009.5010576>.
40. Tsonev D. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride LED // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2014. — Apr. — Vol. 26, no. 7. — P. 637–640.
41. CIE // Commission Internationale de l'Eclairage / Ed. by Cambridge Univ. Press. — Cambridge, U.K., 1931.
42. Singh Ravinder, O'Farrell Timothy, David John P. R. An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications // Journal of Lightwave Technology. — 2014. — Jul. — Vol. 32, no. 14. — P. 2582–2592. — Access mode: <https://doi.org/10.1109/jlt.2014.2328866>.
43. Thorlabs. — Laser Diode FPL1055T Spec Sheet, 2016. — Aug. — Access mode: <https://www.thorlabs.com/drawings/431d34f9a58391b2-C25CF7A0-910A-7323-5050EC316F2FD190/FPL1055T-SpecSheet.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).
44. Thorlabs. — Photo Diode FDGA05 Spec Sheet, 2017. — Feb. — Access mode: <https://www.thorlabs.com/drawings/431d34f9a58391b2-C25CF7A0-910A-7323-5050EC316F2FD190/FDGA05-SpecSheet.pdf> (online; accessed: May 31, 2021).
45. Paschotta R. Flat-Top Beams // Encyclopedia of Laser Physics and Technology. — 2008. — Oct. — Access mode: https://www.rp-photonics.com/flat_top_beams.html (online; accessed: May 31, 2021).
46. Zemax. — Zemax OpticStudio 21.1 User Manual, 2021. — Jan.
47. Wireless local data transmission network through LED lighting compatible with IEEE 802.11 protocol communication systems / O. A. Kozyreva,

I. S. Polukhin, D. S. Shiryayev et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Jun. — Vol. 1236. — P. 012085. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1236/1/012085>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

Таблица А.1 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между лазерным диодом и фотодиодом

№	Расстояние между лазерным диодом и фотодиодом, мм	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0.1	$2.03 \cdot 10^{-1}$
2	1	$8.82 \cdot 10^{-2}$
3	10	$3.33 \cdot 10^{-3}$
4	20	$8.97 \cdot 10^{-4}$
5	50	$1.49 \cdot 10^{-4}$
6	100	$3.70 \cdot 10^{-5}$
7	150	$1.73 \cdot 10^{-5}$
8	500	$1.80 \cdot 10^{-6}$
9	1000	$4.80 \cdot 10^{-7}$
10	2000	$6.00 \cdot 10^{-8}$

Таблица А.2 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от расстояния между собирающей линзой и фотодиодом

№	Расстояние между линзой и фотодиодом, мм	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	5	$7.47 \cdot 10^{-7}$
2	10	$1.66 \cdot 10^{-6}$
3	15	$3.50 \cdot 10^{-4}$
4	15.86	$1.93 \cdot 10^{-3}$
5	20	$4.37 \cdot 10^{-4}$
6	25	$3.32 \cdot 10^{-5}$
7	30	$7.06 \cdot 10^{-6}$
8	35	$3.52 \cdot 10^{-6}$
9	40	$2.30 \cdot 10^{-6}$

Таблица А.3 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от угла поворота источника (система с линзой)

№	Угол поворота источника, °	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0	$1.82 \cdot 10^{-1}$
2	1	$8.47 \cdot 10^{-2}$
3	2	$3.42 \cdot 10^{-2}$
4	3	$2.74 \cdot 10^{-2}$
5	4	$2.41 \cdot 10^{-2}$
6	5	$1.50 \cdot 10^{-2}$
7	6	$3.42 \cdot 10^{-3}$
8	7	0

Таблица А.4 — Результаты симуляции оптической системы в Zemax, зависимость оптической мощности на фотодиоде от угла поворота источника (система без линзы)

№	Угол поворота источника, °	Оптическая мощность на фотодиоде, Вт
1	0	$1.13 \cdot 10^{-2}$
2	1	$1.13 \cdot 10^{-2}$
3	2	$1.13 \cdot 10^{-2}$
4	3	$1.13 \cdot 10^{-2}$
5	4	$1.13 \cdot 10^{-2}$
6	5	$1.13 \cdot 10^{-2}$
7	6	$1.13 \cdot 10^{-2}$
8	7	$1.13 \cdot 10^{-2}$
9	8	$1.12 \cdot 10^{-2}$
10	9	$1.12 \cdot 10^{-2}$
11	10	$1.12 \cdot 10^{-2}$
12	11	$1.11 \cdot 10^{-2}$
13	12	$1.11 \cdot 10^{-2}$
14	13	$1.10 \cdot 10^{-2}$
15	14	$1.10 \cdot 10^{-2}$
16	15	$1.09 \cdot 10^{-2}$
17	16	$1.09 \cdot 10^{-2}$
18	17	$1.08 \cdot 10^{-2}$
19	18	$6.62 \cdot 10^{-3}$
20	19	0