

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Обзор системы VLC	6
1.1 Li-Fi и VLC	6
1.2 Li-Fi передатчик	7
1.3 Li-Fi приёмник	8
1.4 Методы модулирования излучения	8
1.4.1 On-Off Keying	9
1.4.2 Методы импульсной модуляции	10
1.4.2.1 Модуляция длительности импульса	10
1.4.2.2 Фазово-амплитудная модуляция	11
1.4.2.3 Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM)	12
1.4.2.4 Цветовая манипуляция (CSK)	13
Список использованных источников	15

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РЧ — радио частоты.

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

ИК — инфракрасный.

LED (Light emitting diode) — светодиод.

AP (Access point) — точка доступа.

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.

FPS (frames per second) — кадры в секунду.

IoT (internet of thing) — интернет вещей.

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 приведет 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 (AP) 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 помещениях даже в течение светлого времени суток, дополнительное питание передатчиков будет незначительным. 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 электромагнитному 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 комплиментарную 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

В VLC данные передаются при помощи модуляции интенсивности излучения источника (светодиода) – ИМ. Приёмником в такой системе может выступать фотодетектор, который использует принцип прямого детектирования (DD). VLC был придуман для связи «от точки к точке», то есть как замена кабелям [8]. Работа VLC описывается стандартом IEEE 802.15.7-2018 [9].

С другой стороны, Li-Fi описывает полную беспроводную сеть с возможностью двусторонней коммуникации «от точки к многим точкам» и «от многих точек к точке». Помимо этого, Li-Fi включает в себя возможность использования многих точек доступа с быстрым переключением между ними, что позволяет обеспечить мобильность пользователей. То есть стандарт Li-Fi включает в себя стандарт VLC, что показано на схеме 1.1.

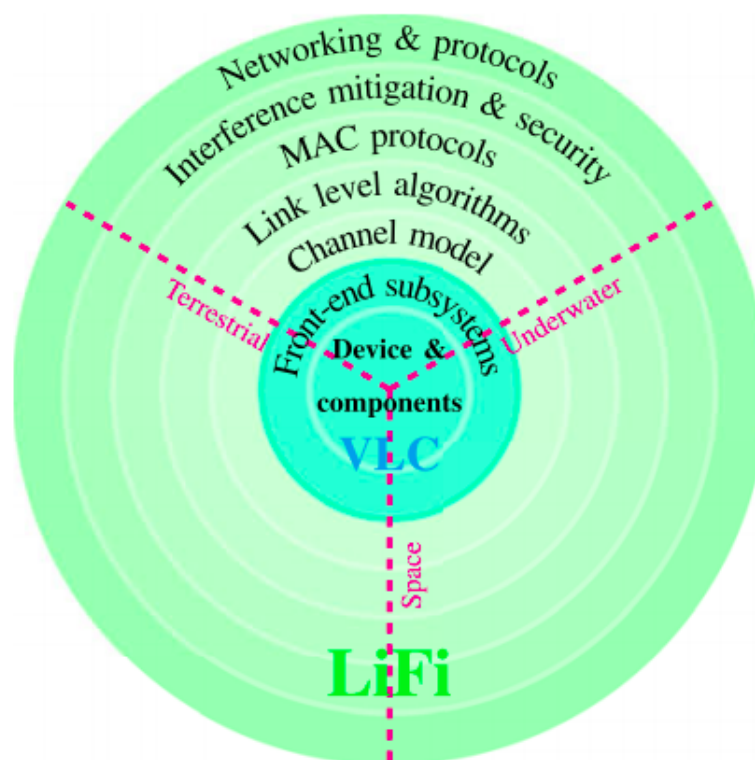


Рисунок 1.1 — Принципиальная схема Li-Fi и VLC [8]

Как и было описано во введении, Li-Fi имеет ряд преимуществ по сравнению с Wi-Fi: он позволяет обеспечить безопасность передачи данных, отсутствие интерференции с ЭМ-приборами, разгрузка РЧ-спектра.

1.2 Li-Fi передатчик

Зачастую в системах передачи информации с помощью видимого света в качестве передатчика выбирается светодиодный светильник (LED luminaire) [10, 11, 12]. 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.

Ключевым требованием к конструкции системы Li-Fi является то, что освещение, которое является основной целью светодиодных светильников, не должно нарушаться из-за использования связи. Таким образом, на работу Li-Fi системы влияет конструкция светодиодного светильника. Белый свет является самым используемым для освещения в помещениях и на улице. Это связано с тем, что цвет предметов под белым светом наиболее сильно похож на цвет предметов под естественным светом. Белый свет у LED светильников достигается двумя разными способами:

а) Синий LED с фосфором – этот источник генерирует белый свет с использованием синего LED, который покрыт жёлтым фосфором. Когда синий свет проходит через жёлтое покрытие, эта комбинация создаёт белый свет. При изменении толщины покрытия можно получать белый свет различной цветовой температуры.

б) Комбинация RGB светодиодов – белый свет может быть получен при смешении красного, зелёного и синего света. Для этого, соответственно, необходимо три светодиода, что повышает стоимость светильника, по сравнению с синим фосфорным LED.

В осветительных системах чаще всего используется первый тип светодиодов из-за их дешевизны, однако в коммуникационных системах фосфорное покрытие значительно ограничивает скорость, с которой светодиод можно переключать, до нескольких МГц [3]. С другой стороны, использование нескольких цветных светодиодов позволяет использовать Color Shift Keying модуляцию при помощи трёх

длин волн, что позволяет получить высокую скорость передачи данных и низкую стоимость LED [13].

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.

Помимо него, возможно и использование камеры, так как они уже встроены в большинство потребительской техники (смартфоны, ноутбуки), что позволяет сделать эти устройства приёмниками в Li-Fi системе. Помимо этого, открывается возможность использования Li-Fi для интернета вещей (IoT) [14]. По сути, камера является матрицей фотодетекторов на плате. Существенным недостатком является то, что так как камеры приспособлены для получения изображений высокого разрешения, используется большое количество фотодетекторов, что значительно снижает количество кадров в секунду (FPS) – скорость обработки излучения. Например, камеры современного смартфона позволяют записывать видео с 60 FPS, что означает, что использование камеры значительно ограничивает скорость получения информации.

Важно отметить, что несмотря на то, что использование камеры позволяет превратить любое мобильное устройство в приёмник, пропускная способность остаётся очень ограничена (порядка килобит в секунду). В то же время отдельные фотодетекторы позволяют принимать информацию с высокой пропускной способностью (сотни мегабит в секунду).

1.4 Методы модулирования излучения

Самое важное отличие системы связи по видимому свету от РЧ-связи заключается в том, что в VLC информация не может быть закодирована в амплитуде и фазе света [15]. Это означает, что техники модуляции, использующие модулирование фазы и амплитуды не могут быть применены в VLC, и информация должна

быть закодирована в интенсивности света – модуляция интенсивности (ИМ). При создании Li-Fi системы необходимо учитывать параметры освещения, некоторые из которых могут повлиять на человека. Пример таких параметров:

а) затемнение¹. В [16] было показано, что для разных действий необходимы разные уровни яркости освещения. Например, освещение в интервале 30 – 100 лк обычно является достаточным для освещения общественных мест. С другой стороны, для освещения офисов и домов необходима освещённость порядка 300 – 1000 лк. Благодаря развитию технологии светодиодных драйверов, становится возможно затемнять светодиоды до любого необходимого уровня в зависимости от применения и требований по сохранению энергии;

б) смягчение мерцания². Для системы коммуникации по видимому свету необходимо, чтобы человек не замечал мерцание яркости света. В [17] было показано, что мерцание может вызывать серьезные физиологические последствия у людей. Поэтому, необходимо модулировать свет с более высокой частотой, чем частота, которую может воспринимать человеческий глаз. В стандарте IEEE 802.15.7 [9] предложено использовать модуляцию интенсивности с частотой выше 200 Гц для избежания вреда для здоровья.

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);

1.4.1 On-Off Keying

В OOK биты данных 1 и 0 передаются включением и выключением светодиода соответственно. В выключенном состоянии светодиод не выключен до конца, но интенсивность его излучения уменьшена. К преимуществам OOK относят простоту реализации. Схожая модуляция используется в волоконных коммуникациях. Большинство ранних работ с использованием OOK в VLC использовали белый светодиод. Если используется синий светодиод с фосфором, то его пропускная способность сильно ограничена (в связи с временем релаксации – несколько МГц [18]).

¹dimming

²flicker mitigation

Было предложено [19] использовать «не возвращающийся к нулю»¹ ООК с синим светодиодом, то можно достичь пропускной способности порядка десятков Мб/с. Помимо этого, можно использовать [18] синий фильтр, чтобы из сигнала медленно реагирующий жёлтый фосфор, в результате чего повысив скорость передачи данных до 40 Мб/с. Аналогично в [20, 21] было предложено комбинирование синего фильтра и аналогового выравнивания на приёмнике для достижения скорости передачи данных 100 и 125 Мб/с соответственно. В [22] было показано, что производительность можно увеличить при помощи лавинных фотодиодов (а не р-і-п фотодиод) в качестве приёмника. Достижимая скорость передачи данных с лавинным фотодиодом и NRZ-ООК составила около 230 Мб/с [22]. В [23] использовался RGB светодиод (который лишен основного недостатка фосфорных светодиодов – ограничения частоты модуляции из-за времени релаксации). Однако в этой работе модуляция происходила только по одному цветовому каналу – красному, в то время как остальные были использованы для создания постоянного белого освещения. Полученная система достигла скорости передачи данных 477 Мб/с с простой NRZ-ООК модуляцией и р-і-п фотодиодным приёмником.

1.4.2 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).

1.4.2.1 Модуляция длительности импульса

PWM является эффективным способом модуляции при помощи затемнения. При PWM длительность импульсов выбирается исходя из желаемого уровня затемнения, в то время как сами импульсы несут модулированный сигнал. Этот сигнал передается в импульсе, во время которого светодиод работает на полной мощности. В [24] было показано, что затемнение от 0% до 100% может быть получено с высокой частотой PWM. Одним из преимуществ PWM является возможность достижения затемнения без изменения интенсивности импульсов, что не приводит к

¹non-return-to-zero (NRZ)

изменению цвета (что может происходить в ООК). К ограничениям PWM можно отнести ограниченную скорость передачи данных (4.8 Кб/с в [24]).

1.4.2.2 Фазово-амплитудная модуляция

PPM является другим способом импульсной модуляции, основанным на фазе импульса. При PPM длина символа информации разделена на t слотов одинаковой длительности, а импульс помещается в один из таких слотов. Положение импульса определяет переданный символ. Из-за этой простоты многие ранние разработки ([25, 26]) оптических беспроводных систем связи использовали именно этот тип модуляции. В [27] авторы предлагают использование системы с адаптивной частотой передачи и повторением сигналов, что позволяет улучшить передачу данных в условиях плохого соединения.

Из-за ограничений, вызванных низкой спектральной эффективностью и скоростью передачи данных при помощи PPM (только один импульс за длительность символа t), были предложены другие варианты фазово-амплитудных модуляций. Обобщенно они называются перекрывающимися фазово-амплитудными модуляциями (OPPM), в которых возможна передача более чем одного импульса за время длительности символа [26] и перекрывание нескольких символов (см. рисунок 1.2). В [28] было показано, что OPPM не только позволяет достичь более высокой спектральной эффективности по сравнению с PPM и ООК, но и предоставляет более широкий интервал уровней затемнения, которые могут быть получены, наряду с более высокими скоростями.

Другим обобщением PPM (предложено в [30]) является схема, называемая многоимпульсная фазово-амплитудной модуляцией (MPPM). Как и в OPPM, она позволяет передавать несколько импульсов за время длительности одного символа, однако MPPM отличается от OPPM тем, что в первой импульс не должен быть непрерывным (см. рис. 1.2). В [26] было показано, что MPPM может достичь более высокой спектральной эффективности, по сравнению с OPPM.

Стандарт IEEE 802.15.7 [9] предлагает схему модуляции, которая называется переменная фазово-амплитудная модуляция (VPPM) и является гибридом PPM и PWM. В VPPM биты закодированы фазой импульса, как и в PPM, но длительность импульса может быть изменена в зависимости от требований (см. рисунок 1.2).

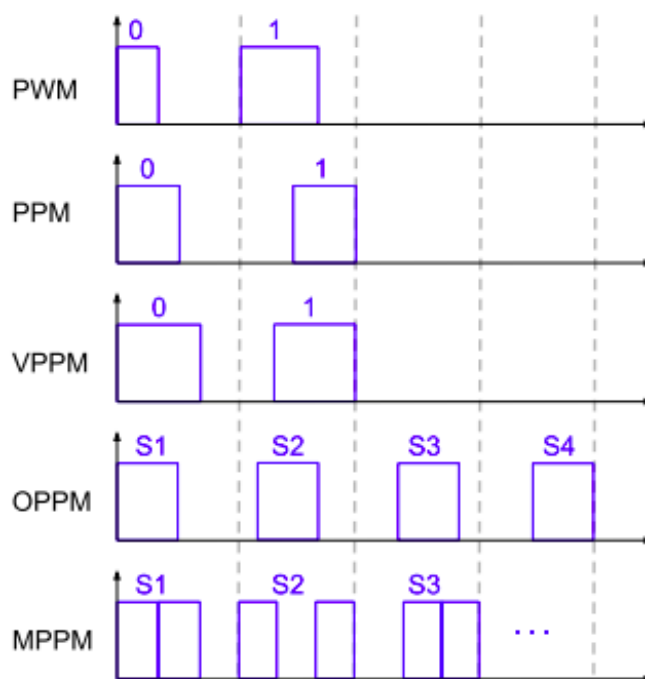


Рисунок 1.2 — Схематическая диаграмма, показывающая различия между модуляцией длительности импульса (PWM), фазово-амплитудной модуляцией (PPM), переменной фазово-амплитудной модуляцией (VPPM), перекрывающейся фазово-амплитудной модуляцией (OPPM) и многоимпульсной фазово-амплитудной модуляцией (MPPM). S_n обозначает n-ный символ. [29]

VPPM обладает простотой и надежностью PPM и позволяет иметь большее количество уровней затемнения за счёт разной длительности импульсов.

1.4.2.3 Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM)

Одним из ограничений модуляций описанных выше является то, что они подвержены межсимвольной интерференции из-за нелинейного частотного отклика каналов связи, основанных на видимом свете. OFDM широко используется в РЧ-связи, так как она позволяет избежать межсимвольную интерференцию. В [31] авторы впервые предложили использование OFDM для VLC. В OFDM канал разделён на несколько ортогональных несущих, по которым данные отправляются параллельными потоками, модулируемыми по несущим. Проблема применения OFDM для беспроводных систем связи по видимому свету заключается в том, что OFDM гене-

рирует комплексные биполярные сигналы, которые необходимо сконвертировать в действительные сигналы.

Другой проблемой OFDM является нелинейность отношения приложенного тока к интенсивности света LED [32]. Это выражается в отношении пиковой к средней мощности и было изучено в [33, 33]. Там авторы предлагают в качестве решения использование светодиода в небольшом интервале, 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, 34].

1.4.2.4 Цветовая манипуляция (CSK)

В стандарте IEEE 802.15.7 [9] 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.

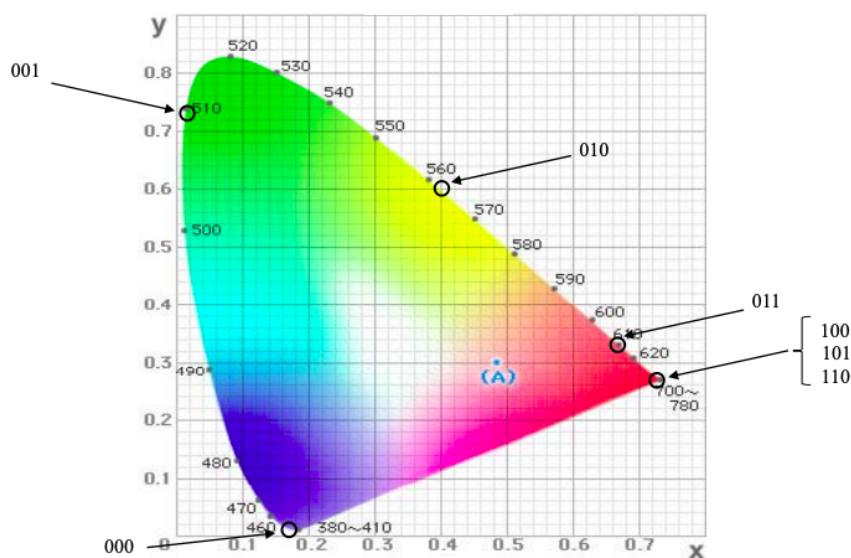


Рисунок 1.3 — Цветовое пространство CIE 1931 [9]

CSK модуляция основана на модели цветового пространства CIE 1931 [35] (рисунок 1.3, таблица 1.1), на которой всем видимым человеческим глазом цветам присвоена пара (x,y) координат. Все это пространство разделено на семь полос, представленных в таблице 1.1

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)

Таблица 1.1 — Семь полос, используемых в CSK, их коды, центральные длины волн и координаты на цветовом пространстве [9]

Суть алгоритма кодирования информации заключается в следующем [9]:

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

в) по координатам символов вычисляется яркость компонент RGB светодиода:

$$\begin{aligned}
 x_s &= P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \\
 y_s &= P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \\
 P_i + P_j + P_k &= 1
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Здесь (P_i, P_j, P_k) – яркости компонент светодиода, (x_s, y_s) – цветовые координаты символа на цветовой плоскости (рисунок 1.3), (x_{ijk}, y_{ijk}) – координаты центральных длин волн компонент светодиода на цветовой плоскости.

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>.
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.
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. 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).
10. 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.
11. Komine T., Haruyama S., Nakagawa M. Performance evaluation of narrow-band OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication // 1st International Symposium on Wireless Pervasive Com-

puting. — 2006. — P. 1–6.

12. 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.

13. 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>.

14. 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>.

15. Tsonev D., Videv S., Haas H. Light fidelity (Li-Fi): Towards alloptical networking // SPIE OPTO. — 2013.

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

17. 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.

18. 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.

19. Park S. Information broadcasting system based on visible light signboard // Wireless Opt. Commun. — 2007. — P. 311–313.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Sugiyama H., Haruyama S., Nakagawa M. Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems // 3rd ICWMC. — 2007. — Mar. — P. 78.

25. Georgiades C. Modulation and coding for throughput-efficient optical systems // IEEE Trans. Inf. Theory. — 1994. — Sep. — Vol. 40, no. 5. — P. 1313–1326.

26. shan Shiu D., Kahn J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication // IEEE Trans. Commun. — 1999. — Aug. — Vol. 47, no. 8.

27. 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.

28. 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>.

29. 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.

30. 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>.

31. Visible light communication using OFDM / M. Afgani, H. Haas, H. Elgala, D. Knipp // 2nd Int. Conf. / Ed. by TRIDENTCOM. — 2006. — P. 129–134.

32. 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.

33. 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>.

34. 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.
35. CIE // Commission Internationale de l'Eclairage / Ed. by Cambridge Univ. Press. — Cambridge, U.K., 1931.