

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Обзор системы VLC	5
1.1 Li-Fi и VLC	5
1.2 Li-Fi передатчик	6
1.3 Li-Fi приёмник	7
1.4 Методы модулирования излучения	7
Список использованных источников	9

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.

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.

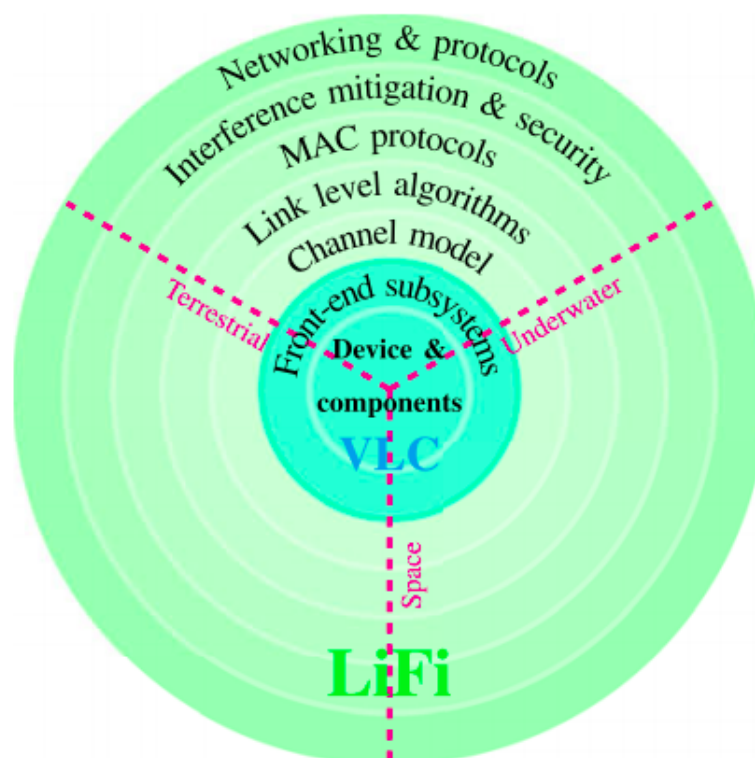


Рисунок 1.1 — Принципиальная схема Li-Fi и VLC [8]

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 (IM). При создании Li-Fi системы необходимо учитывать параметры освещения, некоторые из которых могут повлиять на человека. Пример таких параметров:

а) затемнение (dimming). 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.

б)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Study on the future UK spectrum demand for terrestrial mobile broadband applications : Отчет / Ofcom : 2013. — Июнь.
2. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 : Отчет / Cisco : 2019. — Фев. — Режим доступа: <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 и др. // IEEE Photonics Journal. — 2012. — Окт. — Т. 4. — С. 1465–1473.
4. 3.4 Gbit/s Visible Optical Wireless Transmission Based on RGB LED / G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury и др. // 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. — Янв. — Т. 31, № 6. — С. 918–929.
6. Dimitrov S., Haas H. Information rate of ofdm-based optical wireless communication systems with nonlinear distortion // Journal of Lightwave Technology. — 2013. — Т. 31, № 6. — С. 918–929.
7. VLC: Beyond Point-to-Point Communication / B. Harald, S. Nikola, T. Dobroslav и др. // IEEE Communications Magazine. — 2014.
8. What is LiFi? / Harald Haas, Liang Yin, Yunlu Wang, Cheng Chen // J. Lightwave Technol. — 2016. — Март. — Т. 34, № 6. — С. 1533–1544. — Режим доступа: <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. — Режим доступа: https://standards.ieee.org/standard/802_15_7-2018.html (дата обращения: 2021-03-21).
10. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization / H. Le Minh, D. O’Brien, G. Faulkner и др. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2008. — Т. 20, № 14.
11. 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. — С. 1–6.

12. Komine T., Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights // IEEE Trans. Consum. Electron. — 2004. — Т. 50, № 1. — С. 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. — Май. — Т. 37, № 10. — С. 2418–2424. — Режим доступа: <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. — Фев. — Режим доступа: <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. Žukauskas Artūras, Shur Michael, Gaska Remis. Introduction to solid-state lighting. — New York : J. Wiley, 2002. — ISBN: 9780471215745.