

Пропускная способность системы связи MIMO Li-Fi

А. Ю. Паршин

Кафедра радиотехнических устройств
Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина
Рязань, Россия
parshin.a.y@rsreu.ru

Ю. Н. Паршин

Кафедра радиотехнических устройств
Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина
Рязань, Россия
parshin.y.n@rsreu.ru

Аннотация — Целью статьи является исследование пространственно-временной обработки сигналов в системе MIMO Li-Fi. Вычисление пропускной способности многоканального оптического канала выполняется в случае дискретно-непрерывного канала. Параметры канала моделируются соответствующими функциями плотности вероятности и аддитивным гауссовым шумом в канале.

Ключевые слова — Li-Fi, дискретно-непрерывный канал, обработка сигнала, отношение сигнал/шум, канал MIMO

I. ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение беспроводных систем передачи информации с использованием частотного разделения создает трудности при выделении участков частотного спектра для работы различных систем. Особенно актуальна проблема дефицита частотного ресурса в сотовых системах мобильной связи, системах и устройствах Интернета вещей (IoT). Для решения этой проблемы используют различные методы, среди которых наиболее перспективной является MIMO технология, позволяющая за счет пространственного разнесения в одной и той же полосе частот передавать большее количество информации. При высокой концентрации различных радиосредств возникают взаимные помехи, что ограничивает пропускную способность внутри и вне помещения. Для решения проблемы предлагается использовать электромагнитное излучение различного диапазона длин волн: радиочастотное и оптическое. Исследованию передачи информации с помощью оптических сигналов посвящена обширная библиография [1-3].

Целью работы является анализ эффективности оптической MIMO системы передачи информации при произвольном числе передатчиков и приемников оптических сигналов.

II. АРХИТЕКТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Основная концепция стандарта Li-Fi 802.11bb заключается в оптимальном использовании существующих параметров стандартов 802.11 и внедрении только самых необходимых функций для использования видимого излучения. Стандарт 802.11bb также как и Wi-Fi использует существующие методы формирования сигналов – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM). Но OFDM не может использоваться непосредственно в системах оптической связи, которые используют метод модуляции интенсивности и прямого обнаружения для передачи данных. Чтобы обеспечить подход, основанный на OFDM, используется оптическая OFDM со смещением по постоянному току (DCO-OFDM). Это модуляция интенсивности на основе оптической несущей, при которой передатчик излучает несущую

путем периодического изменения интенсивности света и модулирует эту несущую с помощью обычного OFDM. По сравнению с более простой импульсной модуляцией интенсивности, используемой в 802.15.7 и 802.15.13, DCO-OFDM менее восприимчив к межсимвольным помехам, поддерживая таким образом более высокие скорости передачи данных. Чтобы преобразовать комплексный и биполярный сигнал OFDM в реальный и неотрицательный сигнал DCO-OFDM, устройство преобразует исходный сигнал OFDM в реальный сигнал, а затем смещает его на некоторую положительную величину.

Возможность широкого применения стандарта связи Li-Fi IEEE 802.11ax обеспечивается распространением осветительных приборов на базе светодиодных ламп. Для любого светодиода существует принципиальная возможность одновременно освещать помещение и транслировать массивы бинарных данных. Согласно исследованиям Grand View Research, в ближайшие годы ожидается значительный рост рынка световой технологии передачи данных. Ведущей компанией, занимающейся исследованием, развитием и продвижением Li-Fi, считается PureLiFi, основанная Харальдом Хаасом. Однако интерес к технологии проявляют другие коммерческие структуры. Например, испытания Li-Fi проводили сотрудники фирмы Beamcaster, достигнув скорости передачи данных 1,25 Гбит/с, а также компания Sisoft, которая осуществила передачу данных со скоростью в 10 Гбит/с.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим дискретно-непрерывный канал передачи информации. Излучаемый оптический сигнал модулирован по амплитуде дискретным сообщением, принимающим значения $X = \{0, 1\}$ с вероятностями p_0 , p_1 соответственно. Непрерывный канал описывается выражением $y = \sqrt{P}Hx + v$, где $y = \sqrt{P}Hx + v$ – мощность излучаемого оптического сигнала, $H > 0$ – коэффициент передачи оптического сигнала от передатчика к приемнику оптического сигнала, v – шумовое возмущение с дисперсией σ^2 . Решается задача расчета количества условной информации в дискретно-непрерывном канале. Максимальная пропускная способность наблюдается при равенстве вероятностей $p_0 = p_1 = 1/2$ и при гауссовском распределении вероятностей шумового воздействия v . Количество взаимной информации определяется разностью энтропий $I = h(y) - h(y|x)$. Плотность распределения вероятности наблюдаемого процесса y является суммой плотностей при дискретных значениях сообщения: $w(y) = p_1 w_1(y) + p_0 w_0(y)$, где плотности распределения

вероятности при наличии и отсутствии сигнала соответственно равны:

$$w_0(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}, \quad w_1(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\sqrt{PH})^2}{2\sigma^2}}.$$

Условная плотность распределения вероятности имеет вид:

$$w(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\sqrt{PH}x)^2}{2\sigma^2}}.$$

Пропускная способность одиночного канала в ММО системе определяется выражением [4] для заданного значения канального коэффициента H :

$$C_H = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \log_2 \left(\frac{2e^{-\frac{z^2}{2}}}{e^{-\frac{z^2}{2}} + e^{-\frac{1}{2}(z-q_1)^2}} \right) dz + \\ + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(z-q_1)^2} \log_2 \left(\frac{2e^{-\frac{1}{2}(z-q_1)^2}}{e^{-\frac{z^2}{2}} + e^{-\frac{1}{2}(z-q_1)^2}} \right) dz. \quad (1)$$

где $z = y/\sigma$, $q_1 = \sqrt{PH}/\sigma$.

Рассмотрим ММО систему передачи информации на основе оптического излучения в виде M передающих и N приемных устройств. Канал распространения оптического сигнала моделируется как коэффициенты передачи мощности излучаемого сигнала для каждой пары приемника и передатчика. Таким образом, формируется матрица передачи оптического сигнала $\mathbf{H} = \{h_{11}, \dots, h_{1N}, h_{21}, \dots, h_{MN}\}$, коэффициенты которой удовлетворяют условию $h_{nm} > 0$, $n = 1, \dots, N$, $m = 1, \dots, M$.

Рассматривая ММО систему передачи данных с M передатчиками N приемниками оптических сигналов с использованием собственных лучей [5], запишем общую пропускную способность как сумму пропускных способностей для каждого отдельного луча

$$C_H = \sum_{k=1}^K C_k = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{q}{M} \sigma_k^2 \right), \quad (2)$$

где σ_k – сингулярные числа матрицы канальных коэффициентов, полученные путем разложения по сингулярным числам $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$, $\mathbf{U}$, $\mathbf{V}$ – унитарные матрицы, $q = \frac{P}{\sigma^2}$ – отношение мощности оптического

излучения всех передатчиков к мощности шума в каждом приемном канале, $K = \min\{M, N\}$ – ранг матрицы $\mathbf{H}$. Пропускная способность оптического ММО канала получается постановкой в формулу (2) выражения (1), а также числом собственных лучей K , отношением сигнал-шум в каждом собственном луче

$q_k = \frac{q}{M} \sigma_k^2$. Так как матричный коэффициент передачи канала $\mathbf{H}$ является случайной величиной, то характеристикой эффективности является эргодическая пропускная способность $C = \overline{C_H}$, получаемая усреднением по реализациям коэффициента передачи

$\mathbf{H}$. Для описания затухания оптического сигнала в свободном пространстве используем модель Ламберта, приведенную в работе [2]:

$$H = \frac{m+1}{2\pi d^2} \cos^{m-1}(\varphi) A(\psi),$$

где m – номер моды Ламберта излучаемого оптического сигнала, d – Евклидово расстояние между передатчиком и приемником, φ и ψ – угловые направления, $A(\psi)$ – площадь приемной части фотоэлемента. Для моделирования интенсивности лучей оптического излучения используется метод Монте-Карло [6]. Рассматривается также матрица канальных коэффициентов, состоящая из независимых коэффициентов, распределенных по релеевскому закону.

IV. РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Проведен расчет пропускной способности ММО оптического канала передачи информации методом статистического моделирования. Получены зависимости эргодической пропускной способности от отношения сигнал-шум при различном числе передатчиков и числе приемников оптического сигнала.

Установлено, что расположение передатчиков и приемников оптического сигнала в пространстве существенно влияет на ранг обусловленность канальной матрицы и, следовательно, на пропускную способность оптической ММО системы передачи информации.

Исследовано влияние характеристик среды распространения оптического сигнала на пропускную способность ММО системы передачи информации.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе формулы для расчета пропускной способности дискретно-непрерывного канала связи оптической ММО системы передачи информации позволяют обосновать число передатчиков и приемников оптических сигналов. Полученные выражения планируется применить для расчета с учетом моделей канала связи различного вида.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rallis, K. G. Energy Efficient Cooperative Communications in Aggregated VLC/RF Networks With NOMA / K. G. Rallis, V.K. Papanikolaou, et al. // IEEE Transactions on Communications. – 2023. – Vol. 71(9). – P. 5408-5419. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3292486.
- [2] Georlette, V. Outdoor Visible Light Communication Channel Modeling under Smoke Conditions and Analogy with Fog Conditions / V. Georlette, S. Bette, S. Brohez, R. Pérez-Jiménez, N. Point, V. Moeyaert // Optics. – 2020. – Vol. 1(3). – P.259-281. <https://doi.org/10.3390/opt1030020>.
- [3] Zubow, A. Hybrid-Fidelity: Utilizing IEEE 802.11 MIMO for Practical Aggregation of LiFi and WiFi / A. Zubow, P. Gawłowicz, C. Brunn et al. // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2023. – Vol. 22(8). – P. 4682-4697. DOI:10.1109/TMC.2022.3157452.
- [4] Прокис, Дж. Цифровая связь / под ред. Д. Д. Кловского. – М: Радио и связь, 2000. – 800 с.
- [5] Kuhn, V. Wireless communications over MIMO channels. Applications to CDMA and multiple antenna systems / V.Kuhn – John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [6] Miramirkhani, F. Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications/ F. Miramirkhani, M. Uysal// IEEE Photonics Journal. – 2015. – Vol. 7(6). – P. 1-16. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2504238.