

УДК 621.391

СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

С.И. ПОЛОВЕНЯ, В.В. ДУБРОВСКИЙ, А.Н. СОЛОВЬЕВ, А.Ф. КОРНЕЕВА

*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*

Поступила в редакцию 25 октября 2022

Рассматривается возможность применения основных видов модуляции в системах передачи данных видимым светом, достоинства методов модуляции с несколькими несущими, и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, а также метод модуляции в ортогональном частотно-временном пространстве.

Ключевые слова: модулированный сигнал, связь по видимому свету, Li-Fi.

Введение. В настоящее время оптические системы связи получили широкое распространение и применяются для передачи информации на высокой скорости. Условно их можно разделить на два типа: волоконно-оптические линии связи с применением лазеров [1] и беспроводные оптические системы связи.

Для передачи информации на высокой скорости в беспроводных каналах оптической связи используется излучение с длинами волн различного диапазона. Источниками излучения являются полупроводниковые лазерные диоды или светодиоды. Одной из перспективных и развивающихся технологий является Li-Fi (Light Fidelity).

Особенность применения Li-Fi – это использование в качестве передатчиков полезной информации светодиодных светильников, применяемых и для освещения тоже.

Первые прототипы Li-Fi обеспечивали скорость передачи данных до 150 Мбит/с. В современных лабораторных системах скорость передачи данных может достигать 10 Гбит/с, что без труда может конкурировать со стандартом беспроводной связи 802.11ad – 300 Мбит/с [2].

Родоначальниками технологии Li-Fi являются доктор Г. Пови, профессор Х. Хаас и доктор М. Афгани из Эдинбургского университета [3], которые впервые представили действующий прототип системы Li-Fi на конференции TED Global в Эдинбурге 12 июля 2011 года [4]. Прототип обеспечил скорость передачи данных 10 Мбит/с.

К известным преимуществам Li-Fi по сравнению с Wi-Fi можно отнести: отсутствие необходимости наличия микроволнового сигнала для переноса информации; использование в местах с большим количеством высокочастотных помех; высокая информационная безопасность, так как свет поглощается непрозрачными материалами и не выходит за пределы помещения; использование в местах, где требуется высокая скорость передачи, но нет возможности проложить волоконно-оптические линии связи; высокая скорость передачи данных; использование бесплатного диапазона длин волн; применение для покрытия высокой плотности в замкнутом пространстве; сокращение затрат времени на передачу данных, а следовательно и сокращение энергии; долговечность светоизлучающих приборов; использование под водой и в авиации;

Недостатками Li-Fi являются: ограниченный радиус распространения стенами помещения; необходимость прямой видимости приемника; невозможность использования диммирования для освещения; использование специальных светодиодов; высокая стоимость внедрения.

Применение технологии Li-Fi определяется ее достоинствами.

В медицинской сфере – это использование Li-Fi в операционных, где запрещен доступ к Wi-Fi из-за радиационной опасности и при работе с пациентами со встроенными системами жизнеобеспечения, на которые может негативно повлиять сигнал Wi-Fi [5].

Под водой – это использование Li-Fi для управления глубоководными аппаратами взамен кабелей ограниченной длины [6]. В воздушных судах – это обеспечение доступа к высокоскоростному интернету без влияния на работу бортового оборудования. В промышленных помещениях и торговых центрах для навигации людей и мобильных роботов при низком качестве сигнала GPS. На электро- и атомных станциях для передачи данных оборудования мониторинга и сохранения безопасности данных.

Принцип работы систем Li-Fi основан на модуляции света. Использование того или иного метод модуляции позволяет переводить светодиод из выключенного состояния во включенное. При этом важно обеспечить частоту мерцания светодиода не заметной для человеческого взгляда, но достаточно инерционной, чтобы обеспечить прием сигнала фотодетектором.

Спектр излучения, а также использование нескольких цветов в белом свечении светодиода позволяет создать большое количество каналов связи, а, следовательно, обеспечить передачу многих данных [7].

Технически точка доступа Li-Fi реализуется на базе систем светодиодного освещения, к блокам управления питанием которых подключен кабель для предоставления доступа к глобальной сети. Терминальное оборудование получает сигнал от светодиода посредством видимого света. Необходимо чтобы светильники были оснащены оборудованием для двунаправленной дуплексной передачи.

Точка доступа Li-Fi также должна иметь возможность одновременного обслуживания нескольких пользователей. Запуск системы Li-Fi начинается с подачи постоянного тока к светодиоду для создания потока фотонов. В простейшем случае фотодетектор регистрирует излучение или его отсутствие. Мерцание светодиода с большей частотой позволит передать больше данных. Принятый сигнал демодулируется и обрабатывается в приемном устройстве для получения информации в удобном для восприятия виде. Применение нескольких светодиодов с различными спектрами излучения также позволит увеличить число каналов передачи данных и обеспечить высокую скорость передачи.

Базовые схемы модуляции. Существует множество схем модуляции, которые можно использовать в беспроводных оптических системах. Каждая из них и все вместе имеют определенные параметры, преимущества и ограничения. Схемы модуляции отличаются сложностью реализации, принципами работы, предельной скоростью передачи, помехоустойчивостью и т.д.

В радиосвязи при модуляции сигнала используются два общих параметра: амплитуда и частота. Однако, не смотря на то, что свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом, принцип модуляции не одинаков.

В системах Li-Fi амплитудная модуляция работает так же, как и в радиосистемах, и ее можно назвать модуляцией интенсивности. Применение частотной модуляции к свету проблематично из-за не совершенства конструкции светоизлучающих приборов. Частотная модуляция света подразумевает преобразование изменения интенсивности в высокочастотный сигнал. Изменение частоты импульсов интенсивности, позволяет получить частотную модуляцию.

Для систем Li-Fi с учетом рассеянного излучения используются следующие типы модуляции.

При амплитудной манипуляции (АМн, англ. ASK – amplitude shift keying) каждому биту информации сопоставляется своя амплитуда несущего сигнала. Частота и фаза манипулированного сигнала остаются неизменными. Амплитудная манипуляция имеет наименьшую помехоустойчивость, поэтому редко применяется в чистом виде, но применяется в сочетании с другими видами манипуляции.

Модулированный сигнал имеет вид: $s(t) = A(c(t) + B) \times \cos(\omega t + j_0)$, где $c(t)$ – информационный цифровой сигнал; A, B, j_0 – постоянные; $B \geq 0$, ω – несущая частота. При

множестве возможных значений $c(t) \in \{0,1\}$, $B = 0$. В этом случае модулированный сигнал имеет вид $s(t) = A(c(t)) \cos(\omega t + j_0)$, его амплитуда принимает значение 0 при нулевом значении информационного сигнала и A при единичном. Такой тип манипуляции называется ООК (On-Off Keying, Включено-Выключено).

При $B = 1$ амплитуда модулированного сигнала принимает значение A при нулевом значении информационного сигнала и $2A$ при единичном. ООК является частным случаем ASK при $B = 0$.

Передача данных на основе импульсов подразумевает кодирование данных не синусоидальной, а импульсной волной. Применение импульсных сигналов, основанных на состояниях высокого и низкого уровня, дает два основных преимущества для модуляции. Первое заключается в реализации с помощью одного мощного преобразователя постоянного тока с медленным откликом и переключателя питания, работающего на высоких скоростях для питания светодиода в определенные моменты. Второе – использование переключателя питания для управления затемнением, что значительно упрощает преобразователь постоянного тока [8].

Метод двухпозиционной манипуляции ООК стандартизирован в IEEE 802.15.7, в котором кроме ООК также описаны переменная импульсная позиционная модуляция (VPPM) и цветовая манипуляция (CSK – Color Shift Keying).

В методе ООК светодиод многократно включается и выключается, а символы различаются по ширине импульса, при этом широкий импульс соответствует «1», а узкий – «0». Так как данные кодируются по ширине импульса, передаваемая информация оказывает влияние на яркость свечения светодиода, если не применяются схемы коррекции, т.е. поток бит с несколькими значениями «1» будет казаться ярче, чем поток бит с несколькими значениями «0». Для сглаживания этого эффекта требуется импульс компенсации, который требуется вводить каждый раз в поток «0». Отсутствие символа компенсации может вызвать нежелательное мерцание.

Импульсно-временная модуляция, Pulse time modulation (PTM) – это метод, при котором данные модулируются в соотношении между временем включения и выключения несущего сигнала. Фазово-импульсная модуляция (ФИМ), Pulse position modulation (PPM) и широтно-импульсная модуляция, Pulse width modulation (PWM) попадают в этот класс. Достоинством PTM является отсутствие необходимости применять цифро-аналоговые преобразователи для генерации плавного выходного сигнала, а также не требуется аналого-цифровой преобразователь, схему которого заменяет компаратор. Однако, PTM не работает без полной синхронизации времени включения и выключения передатчика и приемника. Также PTM позволяет обеспечить поддержку мерцания и затемнения без дополнительных средств [9].

Фазово-импульсная модуляция (ФИМ) (англ. Pulse-position modulation, PPM) – это форма модуляции сигнала, при которой амплитуда импульсов высокочастотных колебаний и их длительность остаются неизменными, а передаваемый сигнал изменяет положение (фазу) импульсов. PPM является одним из трех основных способов цифрового преобразования информации в последовательность импульсов.

При PPM кодирование передаваемой информации заключается в изменении позиции импульсов в группе импульсов, которая называется кадром.

PPM обладает хорошей помехозащищенностью, так как носителем информации здесь является не какой-либо информационный параметр импульса, а сам факт его появления в определенный момент времени. Влияние помех может изменить амплитуду и ширину импульса, но полное уничтожение импульса или появление помехи с идентичными импульсу параметрами маловероятно.

VPPM (англ. Variable pulse position modulation) похожа на PPM, но позволяет контролировать ширину импульса для поддержки заданного уровня яркости. Следовательно, VPPM можно рассматривать как комбинацию PPM и широтно-импульсной модуляции PWM (англ. pulse-width modulation). Длительность периода импульсной последовательности, должна быть достаточно большой, чтобы определить значение бита, например «0» представлен положительным импульсом в начале периода, за которым следует отрицательный импульс, а «1» представлена отрицательным импульсом в начале периода, за которым следует

положительный импульс. По сравнению с ООК, PPM более энергоэффективна, но имеет более низкую спектральную эффективность.

Амплитудно-импульсная модуляция (англ. Pulse Amplitude Modulation, PAM) использует для кодирования символов различные уровни яркости. Этот вид модуляции чувствителен

к внешним источникам света, так как они засвечивают оптический канал передачи. Также PAM имеет относительно низкую скорость по сравнению с другими методами [10].

Частотная манипуляция (англ. Frequency Shift Keying, FSK) принципиально похожа на On-Off-Keying. Отличие в переключении между частотами, а не состояниями включено/выключено. Также переключение возможно по цветам [11]. Переключение между цветами задействует красный и синий светодиоды и соответствующие им сигнальные символы: красный – «единица», синий – «ноль». Оба метода переключения позволяют фильтровать шум. В частотно-импульсном варианте это организовано с помощью алгоритма обработки сигнала, а в цветовом варианте за счет применения цветных фильтров поверх фотодиодов.

Метод фазовой манипуляции (англ. Phase Shift Keying, PSK) позволяет кодировать символы, изменяя фазу интенсивности света. PSK можно использовать как самостоятельный вид модуляции, а также в сочетании с другими методами.

Квадратурная амплитудная модуляция (англ. Quadrature Amplitude Modulation, QAM) – это схема модуляции, которая формируется как и другие многопозиционные виды модуляции, путем группировки $k = \log_2 M$ бит в символы и введением соответствия между множеством значений символа и множеством значений сдвига фазы модулированного колебания. Значения сдвига фазы из множества отличаются на одинаковую величину. Используется кодирование кодом Грея.

Минимальный уровень символьных ошибок достигается при условии равенства расстояний между соседними точками сигнального созвездия. Следовательно, сигнальное созвездие должно иметь решетчатый вид.

Высокой спектральной эффективности позволяет достичь использование больших значений M . Однако, применение, в том числе и амплитуды для кодирования сигнала, предъявляет особые требования к линейности усилителей передатчиков и динамическому диапазону этих устройств.

Одной из форм QAM является амплитудно-фазовая модуляция без несущей (англ. Carrierless Amplitude Phase Modulation, CAP), многообещающая высокоскоростная схема модуляции Li-Fi, способная передавать информацию со скоростью 3,22 Гбит/с с использованием RGB светодиодов. QAM и CAP можно комбинировать с OFDM для увеличения производительности систем передачи.

Источники света систем передачи Li-Fi предназначены не только для беспроводной связи, но и для освещения. В качестве источников белого света используются синие светодиоды, которые покрывают люминофором, желтым фосфором, либо светодиоды трех базовых цветов (красного, зеленого и синего). Качество белого света улучшают за счет дополнения конфигурации RGB желтыми светодиодами, что позволяет охватывать желтую часть спектра. Светильники, оснащенные разноцветными светодиодами, могут предоставить дополнительные возможности для модуляции и обработки сигналов в системах Li-Fi [12].

CSK: Цветовая манипуляция (CSK – Color Shift Keying) – это схема модуляции интенсивности (МИ), описанная в IEEE 802:15:7 [3], в которой сигналы кодируются интенсивностью излучаемых светодиодами RGB-цветов. В CSK входящие биты сопоставляются со значениями цветности светодиодов при сохранении постоянного среднего воспринимаемого цвета, т. е. модулированный сигнал приобретает мгновенный цвет, равный физической сумме мгновенных значений яркости трех основных цветов светодиодов. Модулированный сигнал мгновенно перескакивает от символа к символу через различные видимые цвета, что рассматривать как форму сдвига частоты. Кроме того, мгновенное изменение передаваемого цвета не воспринимается человеком благодаря ограниченному критическому порогу слияния мерцания (ПСМ) и критическому порогу слияния цветов (ПСЦ). Временные изменения менее 0,01 секунды не улавливаются человеческим глазом. Поэтому передача данных с каждого светодиода должна быть настроена на усреднение по времени (по ПСМ и ПСЦ) на определенный постоянный во времени цвет. Таким образом, глаз

воспринимает только этот заданный цвет, свечение которого кажется постоянным во времени, но не воспринимает мгновенный цвет, интенсивность свечения которого быстро меняется во времени. Таким образом, при методе CSK существует постоянный усредненный по времени световой поток одновременно с последовательностью информационных символов, быстро изменяющихся по цветности.

Модуляция фазы цвета (CPM) Color phase modulation – это новый вид модуляции, для Li-Fi которой посвящены работы [13]. CPM позволяет передавать входные данные по три бита за раз. Каждый бит соответствует своему цвету с определенным смещением по фазе.

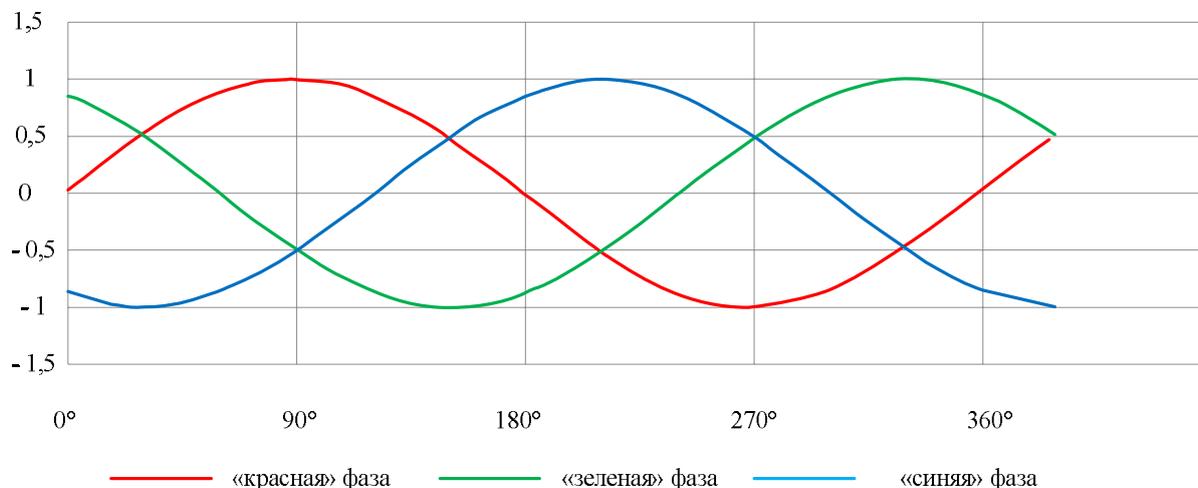


Рис. 1. Начальные фазы сигналов для RGB светодиода

Сигналы с «красной» фазой начинаются с 0° , «зеленой» фазой начинаются с 120° , а «синей» фазой начинаются с 240° (рис. 1). Новый метод модуляции позволяет повысить скорость передачи данных и сократить влияние интерференции между светодиодами красного, зеленого и синего свечения.

Двоичные данные передаются посредством светодиодов видимого света. Модуляция CPM позволяет передавать три бита одновременно тремя разными цветами. Если требуется передать нулевой бит, следует добавить 0° к существующим начальным фазам. Если требуется передать единичный бит, следует добавить 180° к существующим начальным фазам. В табл. показаны соответствующие фазы RGB светодиода для соответствующих битовых комбинаций.

Таблица

Комбинации фазовых сдвигов относительно битовых значений

Последовательность бит	Смещение фазы для RGB светодиода
000	$0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$
001	$0^\circ, 120^\circ, 60^\circ$
010	$0^\circ, 300^\circ, 240^\circ$
011	$0^\circ, 300^\circ, 60^\circ$
100	$180^\circ, 120^\circ, 240^\circ$
101	$180^\circ, 120^\circ, 60^\circ$
110	$180^\circ, 300^\circ, 240^\circ$
111	$180^\circ, 300^\circ, 60^\circ$

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) – этот метод использует большое количество модулированных несущих с достаточным разнесением частот, чтобы они были ортогональными. Опять же, эта частота модулируется интенсивностью. Самым сильным преимуществом OFDM является то, что он обеспечивает устойчивость к эффектам многолучевости, которые приводят к большим расстояниям и высокой скорости передачи данных. Сообщалось о скорости передачи данных свыше трех гигабит в секунду на короткие

расстояния (примерно десять сантиметров) [14]. К сожалению, такие высокие скорости требуют высокоскоростных процессоров.

Модуляции с одной несущей требуют сложного процесса коррекции при использовании на высоких скоростях передачи данных. Кроме того такие эффекты, как скачки напряжения и мерцание ламп дневного света, могут влиять на производительность системы передачи данных в более низких частотных областях используемой полосы пропускания. С другой стороны, методы модуляции с несколькими несущими, такие как OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), могут противостоять сложным условиям в радиоканале, устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами. Кроме того, OFDM поддерживает возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала. Высокая спектральная эффективность является неотъемлемым преимуществом OFDM. Если число поднесущих приближается к бесконечности, OFDM системы показывают почти удвоенную спектральную эффективность в сравнении с традиционными системами с частотным разделением каналов. Способность противостоять интерференции между поднесущими обуславливает хорошие показатели при многолучевом распространении.

При передаче информации входные биты данных модулируются в определенные форматы модуляции, такие как M-QAM. После этого символы M-QAM загружаются в ортогональные поднесущие с интервалом между ними, кратным длительности символа. Параметры поднесущих сигналов подбираются таким образом, чтобы они были по отношению друг к другу ортогональны. Для быстрой реализации данного действия с помощью вычислительных устройств используют алгоритм обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). То есть до ОБПФ сигналы распределены по частоте, а на выходе блока ОБПФ получаются значения сигнала во временной области. Объединяя все значения, получается сложный составной OFDM сигнал. Ортогональность поднесущих позволяет на приеме выделить каждую из них из общего сигнала даже в случае частичного перекрытия их спектров. Поскольку поднесущие располагаются вплотную друг к другу и даже частично накладываются друг на друга спектральная эффективность модулированного OFDM сигнала является высокой.

Связь по технологии Li-Fi строится с помощью готовых оптоэлектронных устройств, таких как светодиоды и фотодетекторы (ФД). Из-за того, что эти источники света испускают некогерентный свет, сигналы OFDM во временной области используются в Li-Fi для модуляции интенсивности света светодиода. В источнике [15] предложены различные варианты оптического OFDM для получения однополярного сигнала на выходе передатчика. Смещение постоянного тока используется в широко распространенном DCO-OFDM [15] для реализации однополярного выхода OFDM во временной области.

Основным недостатком систем передачи данных на основе OFDM является высокий уровень флуктуаций мощности PAPR (англ. Peak-to-AveragePowerRatio) – отношение между максимальной мощностью P_{\max} сигнала $s(t)$ и средней мощностью P_{avg} : $\text{PAPR} = P_{\max} / P_{\text{avg}}$

Из-за проблемы с высокой пиковой мощностью OFDM, при использовании нелинейных усилителей нарушается спектральная сетка OFDM сигнала, что приводит к увеличению коэффициента битовой ошибки при приеме полезного сигнала. Также высокий пик-фактор приводит к ухудшению эффективности усиления сигнала в передатчике.

Применение модуляции OTFS в системах передачи данных видимым светом. Метод модуляции в ортогональном частотно-временном пространстве (OTFS) применяется в области задержка-доплеровский сдвиг. Т. е. метод использует разнесение, как по времени, так и по частоте и одновременно в сочетании с эквализацией трансформирует изменяющийся во времени радиоканал с замираниями, в не зависящий от времени канал с комплексными коэффициентами передачи, которые примерно постоянны для всех символов. Такое решение позволяет значительно упростить работу системы и повысить помехоустойчивость, особенно в системах с высоким доплеровским сдвигом, короткими посылками и антенными решетками с большим числом элементов.

Радиоинтерфейс высокоскоростного беспроводного канала и применяемая в нем сигнально-кодовая конструкция должны поддерживать ряд требований для обеспечения высокой пропускной способности и возможности обеспечения устойчивой связи при большом количестве абонентов и высокой скоростью их перемещения. Известная модуляция OFDM не в состоянии качественно работать в условиях передачи данных видимым светом, т. к. в канале существует значительная интерференция и сильное влияние геометрического расположения приемника [16].

OTFS модуляция представляет собой два двумерных преобразования как в передатчике, так и в приемнике (рис. 2) [17]. Передатчик сначала отображает информационные символы $x[n, m]$, находящиеся в двумерной области задержки-доплеровского сдвига, в символы $X[n, m]$ частотно-временной области посредством комбинации обратного симплектического быстрого преобразования Фурье (ОСБПФ) и применения оконной функции. Этот каскад операций называется преобразованием OTFS. Затем преобразование Гейзенберга применяется к $X[n, m]$ для преобразования частотно-временного модулированного сигнала в сигнал во временной области $s[t]$ для передачи по каналу. Обратные операции выполняются в приемнике, отображая принятый временной сигнал $r[t]$ сначала в частотно-временную область через обратное преобразование Гейзенберга (преобразование Вигнера), а затем в область задержки-доплеровского сдвига для демодуляции символов.

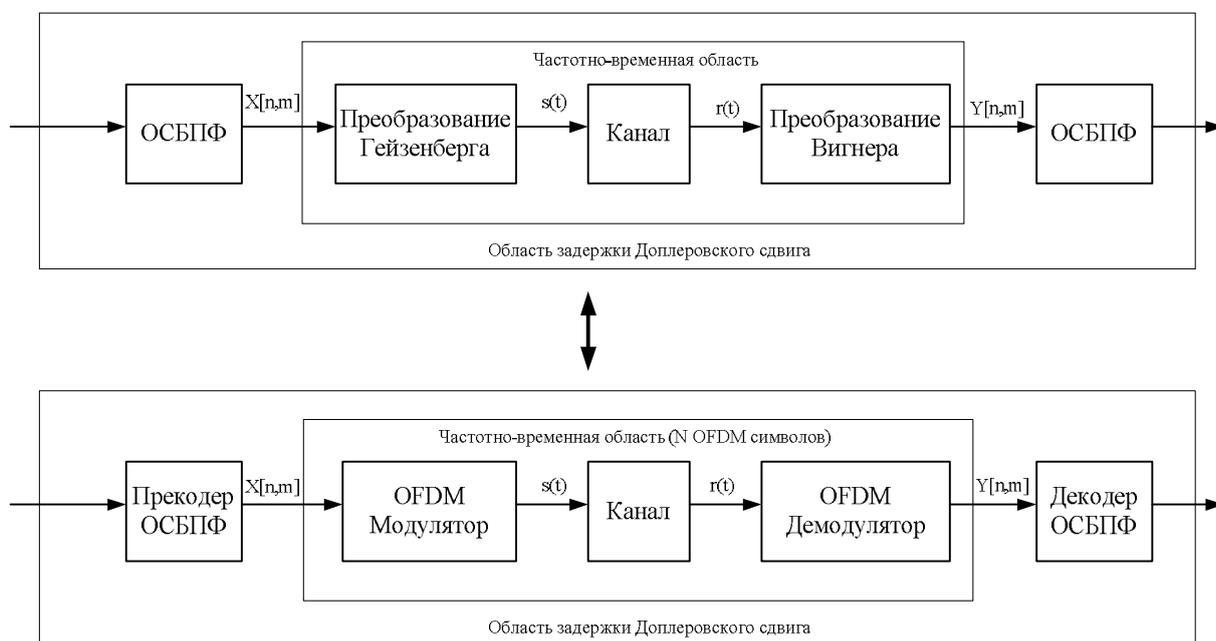


Рис. 2. Структурная схема системы связи OTFS (модулятор и демодулятор)

Представим определенные уравнения, объясняющие принцип работы модуляции и демодуляции OTFS, которые обеспечивают почти постоянный коэффициент передачи в канале по символам. Уравнения используют вариант СБПФ. Пусть $X_p[n, m]$ обозначает периодизированную версию $X[n, m]$ с периодами (N, M) во временной и частотной областях. Преобразование СБПФ для $X_p[n, m]$ для $x_p(k, l) = \text{СБПФ}(X_p[n, m])$ для

$$b_{k,l}[n,m] = e^{-j2\pi \frac{\alpha n l}{M} - \frac{nk}{N} \frac{\delta}{\delta}} \quad (7)$$

Смысл (7) состоит в том, что каждый информационный символ $x[k,l]$ модулируется двумерной базисной функцией $b_{k,l}[n,m]$ в частотно-временной области.

При демодуляции OTFS приемник использует оконную функцию $W_{rx}[n,m]$. Демодуляция состоит из следующих шагов:

1) Вычисление преобразования Вигнера от принятого сигнала, которое дает:

$$Y[n,m] = A_{g_{rx}}(t,n) \Big|_{t=nT, n=mDf} \quad (8)$$

2) Применение оконной функции $W_{rx}[n,m]$ к $Y[n,m]$ для получения частотно-временной функции $Y_W[n,m]$, а затем периодизация результата для получения сигнала $Y_P[n,m]$ с периодом (n,m) :

$$Y_W[n,m] = W_{rx}[n,m]Y[n,m],$$

$$Y_P[n,m] = \sum_{k,l=-\infty}^{\infty} Y_W[n - kN, m - lM]. \quad (9)$$

3) Применение симплектического преобразования Фурье к периодической последовательности $Y_P[n,m]$:

$$\hat{x}[l,k] = y[l,k] \text{СБПФ}(Y_P[n,m]). \quad (10)$$

Последний шаг представляет собой проекцию символов частотно-временной модуляции на двумерные ортогональные базисные функции $b_{k,l}(n,m)$ следующим образом:

$$\hat{x}[l,k] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} Y_P(n,m) b_{k,l}^*(n,m),$$

$$b_{k,l}^*(n,m) = e^{-j2\pi \frac{\alpha m}{L} - \frac{kn}{K} \frac{\delta}{\delta}} \quad (11)$$

Оцененная последовательность $\hat{x}[l,k]$ информационных символов, полученных после демодуляции, задается двумерной циклической сверткой входной последовательности QAM $x[n,m]$ и дискретизированной версией оконной импульсной характеристики $h_w(\times)$:

$$\hat{x}(k,l) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x[n,m] h_w \left(\frac{\alpha k - n}{NT}, \frac{l - m}{MDf} \right), \quad (12)$$

где

$$h_w \left(\frac{\alpha k - n}{NT}, \frac{l - m}{MDf} \right) = h_w(n', t') \Big|_{n' = \frac{k-n}{NT}, t' = \frac{l-m}{MDf}} \quad (13)$$

для $h_w(n', t')$ круговая свертка отклика канала с оконной функцией:

$$h_w(n', t') = \iint h(t, n) w(n' - n, t' - t) e^{-j2\pi l t} dt dn. \quad (14)$$

В (14) оконная функция $w(t, n)$ является симплектическим дискретным преобразованием Фурье (СДПФ) частотно-временного окна $w(t, n)$ определяемого как:

$$w(t, n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} W[n, m] e^{-j2\pi(nmT - tmDf)}, \quad (15)$$

для $W[n, m] = W_{tx}[n, m]W_{rx}[n, m]$ произведение оконных функций передачи и приема. По мере того, как окно $W[n, m]$ увеличивает свой вес во времени и по частоте, $h_w(\times)$ более точно аппроксимирует импульсную характеристику канала $h(\times)$. Из (14) видно, что для данного кадра каждый демодулированный символ $\hat{x}[k, l]$ для данного l k имеет одинаковые коэффициенты передачи канала $h_w(0, 0)$ относительно переданного символа $x[k, l]$. Более того, кроссимвольная интерференция практически исчезает, если:

$$h_w \left(\frac{\Delta k - n}{NT}, \frac{l - m}{MDf} \right) \gg 0 \quad \text{" } n^1 k, m^1 l. \quad (16)$$

Выполнение условия (16) зависит от задержки в канале и доплеровского расширения, а также от формы оконной функции. Эквалайзер в приемнике извлекает полное разнесение каналов. Для этой цели могут использоваться общие схемы эквализации.

Заключение. Рассмотрены перспективы применения систем Li-Fi, основные виды модуляции сигнала при использовании света в качестве носителя информации, существующие ограничения применения данных видов модуляции, рассмотрена возможность использования OFDM. Приведена структурная схема системы связи OTFS. Предложено использовать OTFS в системах Li-Fi.

METHODS AND ALGORITHMS FOR INFORMATION MODULATION OF SIGNALS IN WIRELESS DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

S. PALAVENIA, V. DUBROVSKY, A. SALAUYOU, A. KARNEYEVA

Abstract

The possibility of applying the main types of modulation in visible light data transmission systems, the advantages of multi-carrier modulation methods and orthogonal frequency division multiplexing, as well as the modulation method in orthogonal frequency-time space are considered.

Список литературы

1. Скларов, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О. К. Скларов. – М. : Салон-Пресс, 2004. – 272 с.
2. Frank Deicke, W. K. Li-Fi: A New Paradigm in Wireless Communication. Retrieved from Li-Fi Consortium [Electronic resource] / W. K. Frank Deicke. – 2012. – Mode of access : <http://www.lificonsortium.org/press3.html>. – Date of access : 03.10.2012.
3. Haas, H. High-speed wireless networking using visible light / H. Haas // SPIE Newsroom. – 2013. – Т. 1. – №. 1.

4. TED talks [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb/transcript. – Дата доступа : 01.10.2022.
5. Riurean, S. Li-Fi embedded wireless integrated medical assistance system / S. Riurean [et al.] // World Conference on Information Systems and Technologies. – Springer, Cham, 2019. – P. 350–360.
6. Codd-Downey, R. LightByte: Communicating Wirelessly with an Underwater Robot using Light / R. Codd-Downey, M. Jenkin // ICINCO. – 2018. – P. 309–316.
7. Perwej, Y. The next generation of wireless communication using Li-Fi technology / Y. Perwej // Journal of Computer Networks. – 2017. – Т. 4. – №. 1. – P. 20–29.
8. Zhang, Shuailong 1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using cmos-controlled gan-based leds / Shuailong Zhang [et. al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – Vol. 31. – Iss. 8. – P. 1211–1216.
9. Ma, Xiaoxue Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination / Xiaoxue Ma, Kyujin Lee // Electronics Letters. – 2012. – № 48 (18). – P. 1137–1139.
10. Wang, Jin-Yuan Dimming scheme analysis for pulse amplitude modulated visible light communications / Jin-Yuan Wang [et. al.] // 2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, 2013.
11. Le, N. Frequency shift on-off keying for optical camera communication / N. Le, Trang Nguyen, Y. Jang // 2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) Shanghai. – China, 2014.
12. Ding, J. Impact of Different LED-Spacing in Arrayed LED Transmitter on VLC Channel Modeling / J. Ding [et. al.] // 6th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). – Hefei, 2014. – P. 144–149.
13. Satyanarayana, D Color Phase Modulation For Li-Fi Communication / D Satyanarayana [et. al.] // Palarch's Journal Of Archaeology Of Egypt / Egyptology. – 2020. – Vol. 17. – №. 10. – P. 385–393.
14. Azhar, A. H. A gigabit ps indoor wireless transmission using mimo-ofdm visible-light communications / A. H. Azhar, T. Tran, D. O'brien // IEEE Photonics Technology Letters. – 2013. – Vol. 25. – Iss. 2. – P. 171–174.
15. Ma, Xiaoxue Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination / Xiaoxue Ma, Kyujin Lee, Kyesan Lee // Electronics Letters. – 2012. – № 48 (18). – P. 1137–1139.
16. Bello, P. Characterization of randomly time-variant linear channels / P. Bello // IEEE Trans. Commun. – 1963. – Vol. 11. – №. 4. – P. 360–393.
17. Кучумов, А. А. Обзор технологии модуляции сигнала в ортогональном частотно-временном пространстве / А. А. Кучумов, Е. М. Лобов, В. О. Варламов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – № 6. – С. 41–48.