

ПАРАМЕТРЫ МОДУЛЯЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20

Журавлёв Алексей Павлович,
ФГБОУ ВО "Московский технический университет связи
и информации, Москва, Россия, arpal@yandex.ru

Рюмшин Константин Юрьевич,
ФГБОУ ВО "Московский технический университет связи
и информации, Москва, Россия, e8@mail.ru

Атакищев Олег Игоревич ,
Автономная некоммерческая организация "Институт
инженерной физики г.Серпухов, Россия, aoi007@mail.ru

Титенко Евгений Анатольевич,
ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет",
г. Курск, Россия, johntit@mail.ru

Титенко Михаил Андреевич,
ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет",
г. Курск, Россия, mikhail-titenko@mail.ru

Manuscript received 02 June 2023;

Accepted 05 July 2023

Ключевые слова: модуляция каналов связи,
стандарты связи, параметры модуляции,
классификация систем связи

Работа состоит в описании видов модуляции и их параметров для выбора и построения современных цифровых сетей связи с множественным доступом абонентов к ресурсам сети и высокоскоростного межсетевого обмена. Цель – систематизация систем связи и обеспечение множественного доступа абонентов сети к ресурсам и высокоскоростного обмена данными. Метод решения. Рассмотрены технологии и стандарты современных систем связи в части структуры построения приёмо-передающих устройств от преобразования аналогового сигнала в цифровой вид до потока символьных решений с выхода демодулятора. Проведена классификация типов проводной/беспроводной связи, стандартов связи, видов модуляции на аналоговой несущей. Рассмотрены особенности аппаратной реализации приёмо-передающих устройств, скорости передачи и условия работы каналов связи. Представлены крупнейшие производители элементной базы и специализированных чипов цифровой обработки сигналов, на которых реализуются интерфейсы физического уровня большинства приёмо-передающих устройств систем связи. В результате проведённого анализа был определен набор методов модуляции, которые в настоящее время применяются в большинстве каналов связи, а также основные параметры их работы.

Для цитирования:

Журавлёв А.П., Рюмшин К. Ю., Атакищев О.И., Титенко Е.А., Титенко М.А. Параметры модуляции современных систем связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 13-20.

For citation:

Zhuravlev A.P., Ryumshin K. Yu., Atakischev O.I., Titenko E.A., Titenko M.A. (2023) A Modulation parameters of new communication systems. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 13-20. (in Russian)

Введение

В современных Инфокоммуникационных системах модуляция сигналов занимает важнейшее место при реализации физического уровня обмена информацией. Общепринятая классификация видов модуляции информационного сигнала на аналоговой несущей включает модуляцию с аналоговым информационным сигналом (амплитудная модуляция, частотная модуляция, фазовая модуляция) и модуляцию с цифровым информационным сигналом (амплитудная манипуляция, частотная манипуляция, фазовая манипуляция) [1]. Однако, в настоящее время в большинстве систем связи используются именно цифровые информационные сигналы вместе с цифро-аналоговым/аналогово-цифровым преобразователями (далее – ЦАП/АЦП). Поэтому под амплитудной, частотной или фазовой модуляцией как правило понимается манипуляция, т.е. скачкообразное изменение физического параметра.

В данной работе рассмотрены виды модуляции параметров несущего гармонического сигнала (несущей частоты) с помощью цифрового информационного сигнала. Алгоритмы модуляции реализуются в цифровом виде на базе программируемых логических интегральных схем (далее – ПЛИС), сигнальных процессоров или специализированных чипов. Затем применяется каскад ЦАП и схема аналоговой передачи (фильтрация, усиление сигнала, передающая антенна), которые формируют в соответствии с характеристиками системы связи и условиями передачи вид сигнала, передаваемого в канал связи. На приемном конце выполняется обратное преобразование: аналоговый приемный тракт, АЦП и цифровая реализация схемы демодуляции [2].

В связи с развитием электронной элементной базы и растущей потребностью сферы телекоммуникаций в значительном увеличении скорости передачи информации, в последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий и методов модуляции сигнала вместе с методами помехоустойчивого кодирования информации. Разработаны и реализованы в стандартах связи сложные виды модуляции такие как: многопозиционная (до 4096 символьных позиций) квадратурно-амплитудная модуляция (далее – QAM), модуляция с ортогональным частотным разделением (далее – OFDM), метод доступа с кодовым разделением сигналов (далее – МДКР, CDMA) и сопутствующие технологии модуляции, сочетающие различные комбинации видов модуляции. При этом применяемая технология модуляции, как правило, выбирается исходя из особенностей вида/канала связи и требуемых характеристик системы связи с учётом потенциальных помехоустойчивых возможностей модуляции сигнала.

Анализ параметров модуляции современных систем связи с определением характеристик и условий работы позволяет оценить границы применения и тенденции развития методов модуляции сигналов.

Структура сети связи. Постановка задачи

Расширение сферы инфокоммуникаций характеризуется необходимостью развития высокоскоростных и мобильных средств связи, которая реализуется за счёт высокого научно-технологического потенциала и возможностей современной

элементной вычислительной базы. Свидетельством этому является появление множества технологически новых стандартов проводной и беспроводной связи за последние 20 лет.

Структура глобальной сети связи включает [3] (рис. 1):

- Абонентские устройства связи – реализуют полный набор сервисов связи (телефония, доступ в Интернет, различные мультимедиа-сервисы) с соответствующим качеством обслуживания. Характеризуются наличием нескольких интерфейсов связи и набором средств аутентификации, шифрования для работы в сетях абонентского доступа различных операторов связи. Осуществляют удобную для пользователей интерпретацию принимаемой/передаваемой информации.

- Сети абонентского доступа – осуществляют концентрацию информационных потоков, поступающих от оборудования пользователей, для передачи по высокоскоростным каналам магистральной сети. Включают физические каналы передачи данных (далее – ПД) (каналы "последней мили") до конечного абонента сети, базовые станции (далее – БС), системы аутентификации, биллинга и пр.

- Магистральные линии связи – объединяют отдельные сети доступа, обеспечивая транзит трафика между ними по высокоскоростным каналам. Включают коммутационные узлы связи и высокоскоростные магистральные каналы ПД.

- Информационные ресурсы – предоставляют конечным пользователям различную информацию и/или средства коммуникации с другими пользователями. Могут иметь как локальный, так и распределенный характер размещения.

Системы связи, в которых преобладают каналы "точка-точка", можно назвать линиями связи. А системы связи, в которых работают множество узлов связи и требуется передать информацию по цепочке узлов, называются сетями связи. В беспроводных сетях связи, как правило, реализован множественный абонентский доступ к ресурсу канала связи.

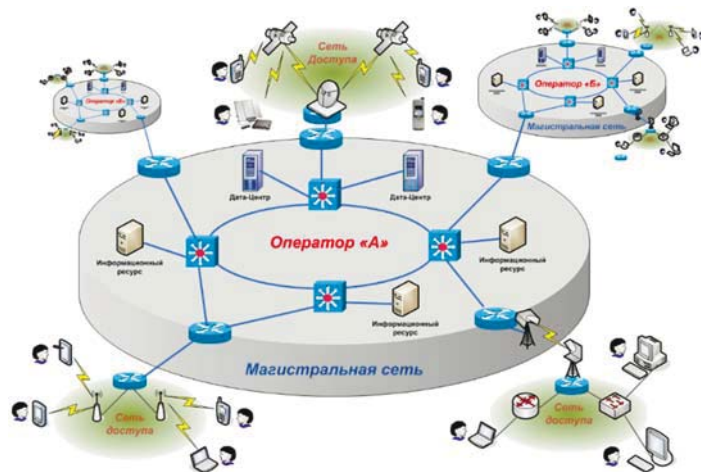


Рис. 1. Структура современной сети связи

По физическим характеристикам каналов связи, зонам покрытия и скорости передачи системы связи [4] можно классифицировать:

- волоконно-оптические линии связи (далее – ВОЛС). Магистральные сети и абонентский доступ. Позволяют надежно передавать наибольшие объемы информации (десятки Тбит/с) на расстояния до нескольких тысяч километров.

– Медные линии связи. Локальные компьютерные сети (УТР-кабели), телефонные линии связи. Составляют значительную часть сегмента реализации "последней мили" в сетях абонентского доступа. Используются для перехода от магистральных ВОЛС к коммутационному оборудованию сетей абонентского доступа.

– Радиорелейные линии связи. Наземные беспроводные системы в определенных условиях успешно конкурируют с волоконно-оптическими и спутниковыми сетями, особенно для связи на сравнительно небольшие расстояния (1 – 100 км). Современные радиорелейные системы связи работают на скорости сотни мегабит в секунду.

– Спутниковые сети связи. Характеризуются возможностью передачи относительно небольших объемов информации (со скоростью 0.1 – 300 Мбит/с) на очень большие расстояния, перекрывая значительные площади земной поверхности (вплоть до построения глобальных систем).

– Сети мобильной наземной связи. Включают сотовые сети связи (GSM, UMTS, LTE), мобильный широкополосный доступ (WiFi), а также системы KB и УКВ связи. Является наиболее популярным и востребованным типом связи. Включает очень большой набор стандартов связи различных поколений и модификаций.

– Сети беспроводной персональной связи (Wireless Personal Area Network – PAN). Обеспечивают коммуникацию устройств непосредственно вокруг человека и в пределах дома/офиса. Стандарты Bluetooth, Zigbee, IrDA. Скорость передачи – от минимальной 100 Кбит/с до максимальной 1000 Мбит/с (быстрые коммуникации).

Данные линии и сети связи являются физически и/или конструктивно специализированными системами, по отдельности они эффективно применимы в ограниченных зонах покрытия с фиксированными классами абонентов (по скорости, по объему передачи). Проблемная ситуация состоит в частичной совместимости характеристик отдельных линий и систем связи при их объединении в глобальную сеть.

Выполнение комплекса требований к современным (перспективным) сетям цифровой связи - расширение территории покрытия, увеличение скорости передачи, расширение классов абонентов сети, повышение надежности связи – связывается исследованием возможности согласования параметров отдельных систем связи для их объединения в единую сеть. Целевое место исследования возможности согласования параметров отдельных систем связи занимает изучение качественных и количественных параметров модуляции, обеспечивающих выбор (подбор) нужных согласующихся характеристик.

Методы модуляции их базовые параметры

В беспроводных сетях связи при использовании общего частотно-временного ресурса канала связи, как правило, организация каналов прямого (от БС к АТ) и обратного (от АТ к БС) направления связи реализуется различными методами, часто, даже на уровне модуляции сигнала [5]. Причиной этому являются как различные характеристики прямого и обратного каналов связи (в том числе, с учетом множественного доступа абонентов), так и различные аппаратные параметры приемно-передатчиков абонента и базовой станции.

Работу большинства систем связи на физическом уровне можно свести к определенному набору видов модуляции [6], учитывающих методы множественного доступа (мультиплексирования) абонентов:

– Угловая модуляция – частотная, фазовая или квадратурно-амплитудная модуляция на одной несущей частоте. Включает ФМ, ЧМ, КАМ, ФМ-4-со-сдвигом, ФМ-4- $\pi/4$, СРМ, GMSK и другие. Применяется частотное, временное или частотно-временное мультиплексирование абонентов.

– Модуляция и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением в виде модификаций – OFDMA, CP-OFDM, SC-FDMA, N-OFDM. Множество ортогональных поднесущих, на которых используются фазовая и квадратурно-амплитудная модуляция с различным количеством символьных позиций (от 2 до 256).

– Модуляция и мультиплексирование с кодовым разделением – CDMA, WCDMA. Кодовое разделение построено на базе фазовой модуляции с применением квазиортогональных кодовых последовательностей, расширяющих спектр сигнала.

Рассмотрим подробнее какие виды модуляции применяются в сетях связи различного типа.

Волоконно-оптические системы связи на рынке коммуникаций представлены в основном коммерческими запатентованными стандартами таких производителей как NEC, NTT, Huawei, Nokia и др. В современных системах ВОЛС при формировании, передаваемого в канал связи, оптического сигнала используются фазовая модуляция с небольшим количеством символьных позиций [7].

Возможность передачи света в двух ортогональных поляризациях позволяет использовать двойную фазовую модуляцию как DP-QPSK – двухполяризационная квадратурная фазовая манипуляция. Однако, при этом на приемном конце в схеме демодуляции необходимо применять специфические алгоритмы поляризационного разделения. Искажения различного типа (хроматическая дисперсия, поляризационные искажения), присутствующие в оптической линии связи, не позволяют эффективно применять квадратурно-амплитудную модуляцию с числом символьных позиций более 16. Оборудование ВОЛС представлено коммутаторами магистральных сетей, а также различными абонентскими устройствами – сетевыми платами, медиаконверторами и пр. Данные особенности определяют необходимость создания конвейеризированных схем обработки оптического сигнала с использованием специализированного вычислительного оборудования.

Проводные локальные компьютерные сети (далее – LAN) составляют большой сегмент сетей "последней мили", поэтому также рассмотрены в статье. В современных стандартах используется многопозиционная амплитудно-импульсная модуляция (до 16-PAM), которая, строго говоря, является модуляцией на цифровой несущей.

Весьма вероятно, следующим шагом для увеличения скорости передачи в локальных сетях может стать переход на многопозиционные фазовые виды модуляции. Оборудование проводных локальных сетей включает коммутаторы/маршрутизаторы и широкий набор абонентских устройств, имеющих проводной сетевой интерфейс связи.

Телефонные линии связи как сегмент передачи данных для "последней мили" в настоящее время не развивается,

ввиду физического ограничения скорости передачи по медной линии. Однако, некоторое количество каналов связи (речевых и низкоскоростной ПД) и коммутационного оборудования обеспечивают сети связи в настоящее время. В основном, это наблюдается в регионах со слабо развивающейся инфраструктурой связи. Стандарты семейства xDSL используют многопозиционные ФМ, КАМ и OFDM виды модуляции. Оборудование представлено автоматическими телефонными станциями операторов связи и абонентскими модемами.

Радиорелейные линии связи подразумевают схему связи типа точка-точка. В основном, обеспечивают магистральные каналы связи на сравнительно небольшие расстояния, когда прокладка кабеля ВОЛС экономически не выгодна. Условия применения радиорелейных систем позволяют использовать антенные системы хорошей направленности. Стандарты радиорелейной связи работают при хороших соотношениях сигнал/шум и минимуме канальных искажений. Поэтому применяются вид модуляции КАМ с большим количеством символьных позиций (до 4096) [8].

К сегменту радиорелейных систем также можно отнести и тропосферные системы связи, которые используют принципы рассеивания тропосферного слоя атмосферы. Однако, применение данного типа связи ограничено ввиду наличия искажений в каналах связи и низких ОСШ, что значительно ограничивает скорость передачи. Оборудование радиорелейных линий связи представляют модемы различного класса применения.

Спутниковые каналы связи характеризуются малыми отношениями сигнал/шум. Ввиду ограниченного частотного ресурса в спутниковых сетях используется физическое (пространственное, поляризационное) разнесение и частотно-временное мультиплексирование каналов связи. Современные спутниковые системы используют ФМ/КАМ модуляцию с количеством символьных позиций до 64 и шириной канала от 0.1 до 100 МГц. Существуют спутниковые системы связи, использующие модуляцию CDMA. Однако, проблемы с усилением сигнала на спутниках-ретрансляторах не позволили CDMA стать более применимой в спутниковом сегменте связи.

В сегменте спутниковой связи можно выделить: магистральные линии связи, сети спутниковой связи VSAT (линейка стандартов DVB) и сети персональной спутниковой связи. Достаточно современной в сегменте спутниковой связи является технология дуплексной передачи на одной несущей (carrier in carrier – CIC). Данная технология позволяет в два раза уменьшить частотный ресурс системы при некоторых потерях (до 3 дБ) в помехоустойчивости. Оборудование спутниковых сетей включает координирующие и базовые станции, спутники-ретрансляторы и модемы фиксированной или подвижной связи.

Сотовые сети связи представляют наиболее востребованный сегмент персональной связи. Сотовая связь базируется на линейке последовательно развивающихся стандартов 3GPP: 2G (GSM, GPRS), 3G (UMTS, WCDMA), 4G (LTE) и 5G. В настоящее время в последних поколениях сотовой связи используется модификация модуляции OFDM с широким набором изменяемых параметров модуляции [9]. OFDM имеет хорошие характеристики помехоустойчивости при

сильных переотражениях сигнала, что характерно для радиосвязи в условиях городской застройки. Более того, современные технологии пространственно-временного кодирования и ММО позволяют использовать многолучность канала связи для увеличения пропускной способности в несколько раз. Адаптивные антенные системы и алгоритмы пространственной селекции позволяют устанавливать индивидуальные параметры модуляции для абонента в локальной зоне. Оборудование сотовых сетей включает базовые станции и абонентские устройства – мобильные телефоны, модемы.

Сети широкополосного доступа или беспроводные локальные сети обеспечивают высокоскоростную передачу данных в сегменте "последней мили". Наиболее востребованные сети представлены линейкой стандартов WiFi IEEE 802.11 [10]. Практически сразу в данных стандартах стала применяться модуляция OFDM. В стандартах WiFi последних модификаций применяются технологии пространственно-временного кодирования такие же как в сотовых сетях связи. Оборудование беспроводных локальных сетей включает точки доступа и широкий набор абонентских устройств, имеющих беспроводной сетевой интерфейс связи.

Системы и сети УКВ (ОВЧ/УВЧ) связи предоставляют абонентам низкоскоростные сервисы связи на базе мобильных устройств (радиостанций). Особенностью данного типа связи является возможность быстрого развертывания сети без участия оператора связи. Данные системы используются на расстоянии до десяти км в случае, когда нецелесообразно или невозможно использование сотовой связи. Например, для связи экстренных служб. Системы УКВ связи представлены большим набором стандартов, в том числе, не публикуемых коммерчески. Оборудованием является большой набор радиостанций различного назначения, модемы и базовые станции УКВ связи.

Системы КВ (ВЧ) связи являются низкоскоростными, но позволяют организовать связь на большие расстояния. Если не учитывать системы радиовещания, в настоящее время системы КВ радиосвязи рассматриваются только с точки зрения связи экстренных ситуаций и в специальных целях, когда невозможно использование других видов связи. КВ связь характеризуется очень ограниченной полосой передачи и наличием большого количества искажений в канале связи. Оборудование представлено приёмо-передающими устройствами различного класса и назначения.

Сети беспроводной персональной связи описывается линейкой стандартов IEEE 802.15 [11]. Линейка разделена на несколько групп целевого применения: Bluetooth устройства, высокоскоростные WPAN, низкоскоростные WPAN, сети Mesh, мониторинг показателей тела человека (Body Area Network – BAN), связь с помощью видимого света. В статье данные группы объединены в два направления – "низкоскоростные" и "высокоскоростные" PAN. Сети персональной связи используют разрешённые для общего использования диапазоны частот (например, 2.4 ГГц).

Поэтому одной из основных проблем физического уровня является коллизия разделения общего частотно-временного ресурса множеством радиопередающих устройств разных стандартов. Решение коллизии осуществляется применением технологии псевдослучайной перестройки рабочей частоты (далее – ППРЧ) (frequency-hopping spread spectrum – FHSS)

[12], которая в некоторых стандартах реализуется на базе модуляции OFDM.

"Низкоскоростные" персональные сети. Данный сегмент представляет относительно низкоскоростную связь с энергетически ограниченными персональными устройствами. Оборудование включает устройства "умного дома", пульты управления, наушники, датчики показателей здоровья и пр. Данный сегмент связи также реализует торгово-промышленные логистические сервисы связи – например, метки складского учета.

"Высокоскоростные" персональные сети. Динамично развивающийся сегмент систем персональной связи. Позволяет организовать быстрые коммуникации (в настоящее время до 1 Гбит/с) между "умными" устройствами в пределах одного помещения.

Оборудование включает широкий набор устройств с беспроводным интерфейсом персональной связи; в том числе специализированные периферийные устройства, расширяющие функционал смартфонов.

Результаты и обсуждение

Основные параметры модуляции современных систем связи представлены в таблице 1. Максимальная полоса показана для работы канала связи на одной несущей частоте, без учета возможностей частотной агрегации каналов связи.

Диапазон скоростей представлен для одного абонента/устройства и округлен до ближайших значений десятичного порядка.

В таблице 2 представлены основные производители специальных микропроцессоров, показана их роль в реализации интерфейсов физического уровня, на которых построено оборудование современных систем связи. Представлены крупнейшие производители элементной базы и специализированных микропроцессоров в сфере цифровой обработки сигналов.

Также возможно применение элементной базы ПЛИС для создания параллельных потоковых вычислителей процессов цифровой обработки сигналов [13].

Таблица 1

Характеристики систем связи (x – цифровой код спецификации)

Тип связи	Технология связи	Стандарт	Модуляция	Несущие частоты	Полоса (макс.) МГц	Скорость Мбит/с
ВОЛС	xGBASE CTDM DWDM	10GBASE-Lx, 10GBASE-Ex, 10GBASE-Zx ITU G.694.2 ITU G.694.1	PSK DP-QPSK 16QAM	180-380 ТГц (780-1620 нм)	100000	1000-100000
Проводная/медная LAN	Ethernet 1G Ethernet 10G Ethernet	IEEE 802.3xx IEEE 802.3ab xGBASE-T (IEEE 802.3an, 802.3bz и пр.)	PAM 2-16	-	500	100-10000
Телефонные линии	xDSL ISDN	ITU G991.x, ITU G992.x, ITU G993.x ITU-T Q.921	PSK, QAM OFDM- QAM	0.002-20 МГц	30	0.01-100
Радиорелейная связь	ITU Fix. service ETSI DRRS	ITU-R F.xxx ETSI EN 301 xxx	PSK, QAM	0.3-80 ГГц	1000	100-10000
Спутниковая связь	VSAT Personal Sat.	DVB-S2, DVB-S2X, DVB-RC'S GMR-1, GMR-2, IAI-2	PSK, QAM CDMA	0.4-50 ГГц	100	0.01-100
Сотовые 2G, 3G	GSM CDMA2000 UMTS	ETSI GSM xx.xx cdma2000 1x EV-DO, 3GPP2 S.x 3GPP TS xx.xx (Rel 99, Rel 4-7), ETSI TS xxx	GMSK CDMA WCDMA	0.8-2.2 ГГц	5	0.01-10
Сотовые 4G, 5G	LTE WiMAX 5G, 5G NR	3GPP TS xx.xx (Rel 8-12), ETSI TS xxx IEEE 802.16x 3GPP TS xx.xx (Rel 13-18), ETSI TS xxx	OFDMA SC-FDMA N-OFDM	0.45-6, 24-56 ГГц	100 400	10-10000
Беспроводная WLAN	Wi-Fi	IEEE 802.11x	DSSS OFDM	2.4-2.5, 5.1-5.9 ГГц	160	1-1000
ОВЧ/УВЧ связь	DMR APCO 25 TETRA NXDN	ETSI TS 102 361 APCO 25 TETRA V+D, TETRA 2 NXDN CAI	FSK PSK QAM	50-1000 МГц	0.05	0.01-0.1
ВЧ связь	ALE STANAG PACTOR	MIL-STD-188-141A, MIL-STD-188-141B STANAG 5066 PACTOR-3, PACTOR-4	FSK PSK QAM OFDM	1-30 МГц	0.05	0.01-0.1
Низкоскоростная PAN	Bluetooth ZigBee Z-Wave	Bluetooth 1.0-1.2/2.0-2.1/3.0/4.0-4.2/5.0-5.3 IEEE 802.15.4 ITU-T G.9959	FSK PSK OFDM	2.4-2.5 ГГц 0.8-1 ГГц	20	0.001-100
Высокоскоростная PAN	Wireless USB	IEEE 802.15.3	UWB OFDM	3-10 ГГц	500	10-1000

Производители микропроцессоров для оборудования систем связи

Производитель	Производимые микропроцессоров	Интерфейсы связи	Производимое оборудование
Texas Instruments	Сигнальные процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов АЦП/ЦАП Генераторы частоты Конвертеры частоты Усилители Фильтры Трансиверы	2G/3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Собственный 2.4 ГГц Мультистандарт Ethernet ВОЛС	Обширная элементная база различных компонентов сетей связи
Analog Devices	Сигнальные процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов АЦП/ЦАП Генераторы частоты Конвертеры частоты Усилители Фильтры Трансиверы	2G/3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Мультистандарт Ethernet ВОЛС	Обширная элементная база различных компонентов сетей связи
Qualcomm	Процессоры ARM Чипы беспроводных интерфейсов Беспроводные интерфейсы на базе CDMA модуляции	4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Мультистандарт Ethernet	Многофункциональные компо- ненты мобильных терминалов, смартфонов, модемов
Broadcom	Чипы сетевых устройств Чипы беспроводных интерфейсов Чипы интерфейсов ВОЛС Усилители Фильтры	4G/5G Wi-Fi Bluetooth PAN ВОЛС	Комплекующие сетевых устройств, чипсеты сетевых интерфейсов
Intel	Процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов	Wi-Fi Bluetooth Ethernet	Комплекующие ЭВМ, сетевое оборудование, чипсеты сетевых интерфейсов
MediaTek	Чипы беспроводных интерфейсов Многофункциональные чипы	3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth Мультистандарт	Компоненты сетевых устройств
Marvell	Чипы проводных интерфейсов	Ethernet ВОЛС	Сетевые устройства

Данные таблицы определяют возможности совместимости различных систем связи при их объединении в цифровую сеть связи, уделяя внимание прежде всего множественному доступу абонентов сети к ресурсам и высокоскоростному обмену данными.

Современные системы и стандарты связи в зависимости от протяжённости линий связи и используемых видов модуляции в каналах связи можно представить в виде диаграммы (рис. 2). Слева-направо уменьшается протяжённость линии связи.

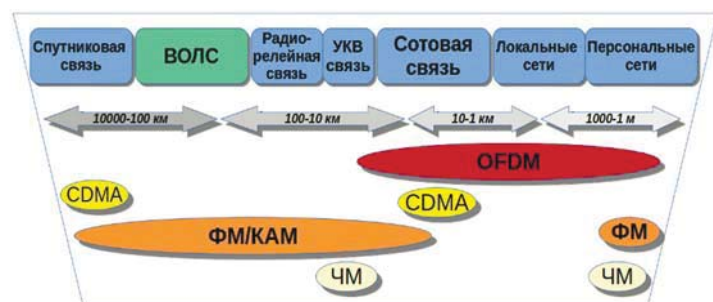


Рис. 2. Диаграмма распределения видов модуляций в зависимости от протяжённости линий связи

Заключение

Анализ физического уровня современных систем связи показал, что наиболее развивающимся являются виды модуляции линейки OFDM в сегменте сотовых сетей связи и широкополосного доступа. Помимо этого, виды фазовой модуляции (ФМ/КАМ) активно развиваются в сегментах ВОЛС, спутниковой и радиорелейной связи.

На основе анализа характеристик систем связи и распределения видов модуляции по дальности применения выделяются основные тенденции развития методов модуляции сигналов для различных прикладных задач [14, 15]:

- Использование динамического частотно-временного мультиплексирования каналов связи для обеспечения множественного доступа абонентов в сотовых сетях, спутниковых сетях.

- Использование сложных адаптивных методов формирования сигнала на физическом уровне. Адаптивные схемы модуляции в сочетании с помехоустойчивым кодированием высокой вычислительной сложности с поддержкой параллельных вычислений сигнальными микропроцессорами или специализированными потоковыми вычислителями на ПЛИС.

– Многократное использование частотных ресурсов связи. Технологии пространственно-временного кодирования, ММО, адаптивные антенные системы, технология carrier-in-carrier.

– Включение механизмов качества обслуживания в современные стандарты связи на уровне модуляции. Разбиение информационных потоков в зависимости от типа нагрузки на приоритетные подпотоки, поддержка QoS на всей протяженности линии связи.

Литература

1. Modulation. <https://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 530 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
5. Wyglinski A., Nekovee M., Hou Y.T. Cognitive radio communications and networks: principles and practice. 2010. DOI: 10.1002/9781118376270. 737 p.
6. Gyasi-Agyei A. Telecommunications Engineering, Principles and Practice. World Scientific, 2019. ISBN: 978-981-120-027-4. 760 p.
7. Fiber-Optic Communication Standards. <https://what-when-how.com/fiber-optics/fiber-optic-communication-standards/>.
8. Huawei Technologies Co. Product Description, Full-outdoor microwave RTN 310/320 Radio Transmission System. 2021. <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless-network/microwave/fo>.
9. Ndujiuba C. Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems. Journal of Wireless Networking and Communications 5(2). 2015. DOI: 10.5923/j.jwnc.20150502.02, pp. 60-66.
10. Banerji S., Chowdhury R. On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. International Journal of Mobile Network Communications & Telematics 3(4), 2013. DOI: 10.5121/ijmnc.2013.3405.
11. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN). <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
12. Sultan G. Slow Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulation. In book: Digital Frequency Synthesis Technique to Implement a Novel Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulator. ProQuest, 2020.
13. Titov V.S., Konovalchik A.P., Titenko E.A. High-performance computing systems based on FPGA // Proceedings of the South-Western State University. 2012. No. 4. (43). Part 2. C.73-77.
14. Tatarnikova T.M., Bogdanov P.Yu. Metric characteristics of detecting abnormal traffic in networks of the Internet of things // T-Comm: Telecommunications and transport. 2022. T. 16, No. 1. P. 15-21.
15. Abramova E.S., Pavlov I.I., Adamov E.V., Abramova E.S., Adamov E.V. et al. Formation of a cryptographic key in coupled transceiver atmospheric laser systems // T-Comm: Telecommunications and transport. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 33-41.
13. Титов В.С., Коновальчик А.П., Титенко Е.А. Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №4. (43). Ч.2 С. 73-77.
14. Татарникова Т.М., Богданов П.Ю. Метрические характеристики обнаружения аномального трафика в сетях интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 1. С. 15-21.
15. Абрамова Е.С., Павлов И.И., Адамов Е.В. и др. Формирование криптографического ключа в сопряженных приемо-передающих атмосферных лазерных системах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 2. С. 33-41.

MODULATION PARAMETERS OF MODERN COMMUNICATION SYSTEMS

Alexey P. Zhuravlev, MTUCI, Moscow, Russia, arpal@yandex.ru

Konstantin Yu. Ryumshin, MTUCI, Moscow, Russia, e8@mail.ru

Oleg I. Atakischev, IIF, Serpukhov, Russia, aoi007@mail.ru

Evgeny A. Titenko, South West State University, Kursk, Russia, johntit@mail.ru

Mikhail A. Titenko, South West State University, Kursk, Russia, mikhail-titenko@mail.ru

Abstract

The work consists in describing the types of modulation and their parameters for the selection and construction of modern digital communication networks with multiple subscriber access to network resources and high-speed interconnection. The goal is to systematize communication systems and provide multiple access of network subscribers to resources and high-speed data exchange. Solution method. The article discusses the technologies and standards of modern communication systems in terms of the structure of the construction of receiving and transmitting devices from the conversion of an analog signal into a digital form to the flow of symbolic solutions from the output of the demodulator. The classification of types of wired/wireless communication, communication standards, types of modulation on an analog carrier is carried out. The features of the hardware implementation of receiving and transmitting devices, transmission speeds and operating conditions of communication channels were taken into account. The largest manufacturers of the element base and specialized digital signal processing chips are presented, on which the interfaces of the physical layer of most receiving and transmitting devices of communication systems are implemented. As a result of the analysis, a set of modulation types that are currently used in most communication channels was determined, as well as the main parameters of their operation.

Keywords: modulation of communication channels, communication standards, modulation parameters, classification of communication systems

References

1. Modulation. <https://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>.
2. Prokis J. Digital communication. Moscow: Radio and communication, 2000. 800 p.
3. K. Feer. Wireless digital communication. Methods of modulation and spread spectrum. Moscow: Radio and communication, 2000. - 530 p.
4. B. Sklyar. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. Moscow: Williams, 2003, 1104 p.
5. A. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou. Cognitive radio communications and networks: principles and practice. 2010. DOI: 10.1002/9781118376270. 737 p.
6. A. Gyasi-Agyei. Telecommunications Engineering, Principles and Practice. World Scientific, 2019. ISBN: 978-981-120-027-4. 760 p.
7. Fiber-Optic Communication Standards. <https://what-when-how.com/fiber-optics/fiber-optic-communication-standards/>.
8. Huawei Technologies Co. Product Description, Full-outdoor microwave RTN 310/320 Radio Transmission System. 2021. <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless-network/microwave/fo>.
9. C. Ndujiuba. Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems. Journal of Wireless Networking and Communications 5(2). 2015. DOI: 10.5923/j.jwnc.20150502.02, pp. 60-66.
10. S. Banerji, R. Chowdhury. On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. International Journal of Mobile Network Communications & Telematics 3(4), 2013. DOI: 10.5121/ijmnc.2013.3405.
11. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN). <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
12. G. Sultan. Slow Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulation. In book: Digital Frequency Synthesis Technique to Implement a Novel Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulator. ProQuest, 2020.
13. V. S. Titov, A. P. Konovalchik, E. A. Titenko. High-performance computing systems based on FPGA. *Proceedings of the South-Western State University*. 2012. No. 4. (43). Part 2, pp. 73-77.
14. T. M. Tatarnikova, P. Yu. Bogdanov. Metric characteristics of detecting abnormal traffic in networks of the Internet of things. *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 1, pp. 15-21.
15. E. S. Abramova, I. I. Pavlov, E. V. Adamov, E. S. Abramova, E. V. Adamov et al. Formation of a cryptographic key in coupled transceiver atmospheric laser systems. *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 2, pp. 33-41.

Information about authors:

Alexey P. Zhuravlev, head of laboratory, MTUSI, Moscow, Russia

Konstantin Yu. Ryumshin, Doctor of Technical Sciences, Department Professor, MTUSI, Moscow, Russia

Oleg I. Atakischev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy General Director for Special Projects, IIF, Serpukhov, Russia

Evgeny A. Titenko, Leading Researcher South West State University, Kursk, Russia

Mikhail A. Titenko, Postgraduate South West State University, Kursk, Russia