



НОВОСТИ  
СТАТЬИ

ТЕХНОЛОГИИ

## Перспективные способы модуляции в широкополосных системах передачи данных

Сегодня специалистов в области коммуникаций уже не удивишь загадочным словосочетанием Spread Spectrum. Широкополосные (а именно они и скрываются за этими словами) системы передачи данных отличаются друг от друга способом и скоростью передачи данных, типом модуляции, дальностью передачи, сервисными возможностями и др. В предлагаемой статье предпринята попытка классифицировать широкополосные системы на основе используемой в них модуляции.

## Основные положения

Широкополосные системы передачи данных (ШСПД) подчиняются в части протоколов единому стандарту IEEE 802.11, а в радиочастотной части - единым правилам FCC (Федеральной комиссии США по связи). Однако при этом они отличаются друг от друга способом и скоростью передачи данных, типом модуляции, дальностью передачи, сервисными возможностями и так далее.

Все эти характеристики играют важное значение при выборе ШСПД (потенциальным покупателем), и элементной базы (разработчиком, производителем систем связи). В настоящем обзоре предпринята попытка классифицировать ШСПД на основе наименее освещенной в технической литературе характеристики, а именно их модуляции.

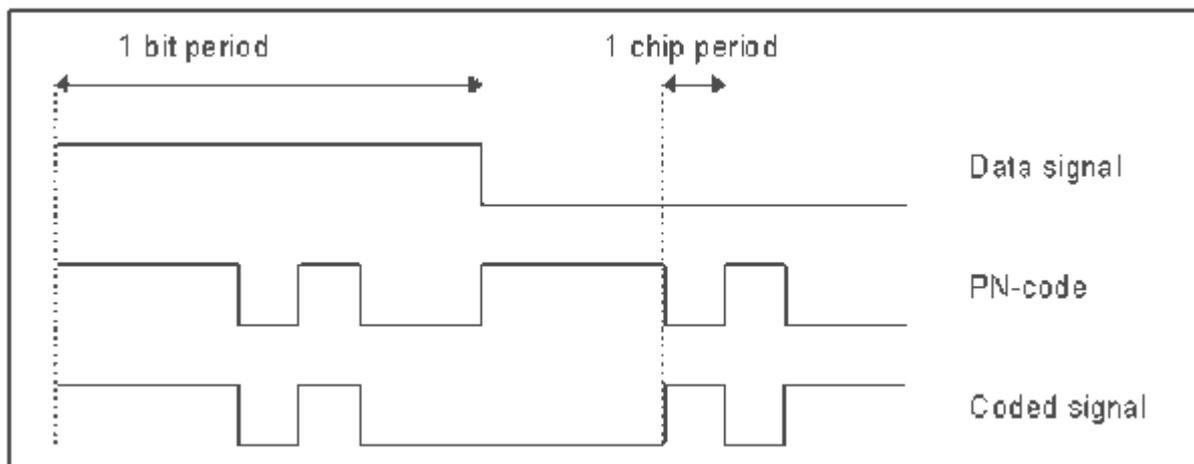
Используя различные типы дополнительных модуляций, применяемых совместно с фазовой (BPSK) и квадратурной фазовой модуляцией (QPSK) для увеличения информационной скорости при передаче широкополосных сигналов в диапазоне 2,4 ГГц, можно достичь скорости передачи информации до 11 Мбит/с, принимая во внимание ограничения, накладываемые FCC на работу в этом диапазоне. Поскольку предполагается, что широкополосные сигналы будут передаваться без получения лицензии на частотный диапазон, то характеристики сигналов ограничиваются для уменьшения взаимной интерференции.

Данными типами модуляции являются различные формы M-ичной ортогональной модуляции (МОК), фазоимпульсная модуляция (PPM), квадратурная амплитудная модуляция (QAM). К широкополосным можно отнести также сигналы, получаемые при одновременной работе по нескольким параллельным каналам, разделяемым по частоте (FDMA) и/или по времени (TDMA). В зависимости от конкретных условий выбирается тот или иной тип модуляции.

## Выбор типа модуляции

Основная задача любой системы связи - передача информации от источника сообщения к потребителю наиболее экономичным образом. Поэтому выбирают такой тип модуляции, который сводит к минимуму действие помех и искажений, достигая тем самым максимальной информационной скорости и минимального коэффициента ошибок. Рассматриваемые типы модуляции отбирались по нескольким критериям: устойчивость к многолучевому распространению; интерференция; количество доступных каналов; требования к линейности усилителей мощности; достижимая дальность передачи и сложность реализации.

## DSSS-модуляция



Большинство из представленных в обзоре типов модуляции основаны на широкополосных сигналах, получаемых методом прямой последовательности (DSSS), - классических широкополосных сигналах. В системах с DSSS расширение спектра сигнала в несколько раз позволяет во столько же раз уменьшить спектральную плотность мощности сигнала. Расширение спектра обычно осуществляется путем умножения сравнительно узкополосного сигнала данных на широкополосный расширяющий сигнал. Расширяющий сигнал или расширяющий код часто называется шумоподобным кодом, или PN(pseudonoise)-кодом. Принцип описанного расширения спектра показан на рис. 1.

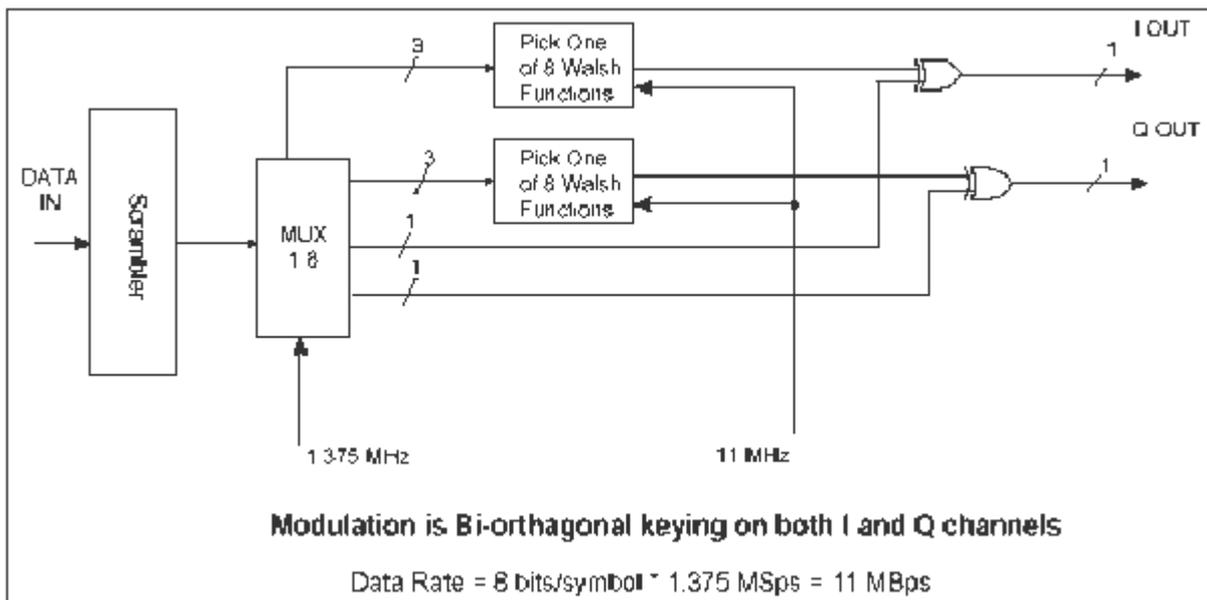
Bit period - период следования информационного бита

Chip period - период следования чипа

Data signal - данные  
 PN-code - шумоподобный код  
 Coded signal - широкополосный сигнал  
 DSSS/MOK-модуляция

Широкополосные сигналы, получаемые методом прямой последовательности, с M-ичной ортогональной модуляцией (или кратко МОК-модуляция) известны уже давно, но на аналоговых компонентах их довольно трудно реализовать. Применяя цифровые микросхемы, сегодня можно использовать уникальные свойства этой модуляции.

Разновидностью МОК является M-ичная двуортогональная модуляция (МВОК). Увеличение информационной скорости достигается за счет применения одновременно нескольких ортогональных PN-кодов при сохранении той же частоты следования чипов и формы спектра. МВОК-модуляция эффективно использует энергию спектра, то есть имеет достаточно высокое отношение скорости передачи к энергии сигнала. Она устойчива к интерференции и многолучевому распространению.



Из приведенной на рис. 2 схемы МВОК-модуляции совместно с QPSK видно, что PN-код выбирается из M-ортогональных векторов в соответствии с управляющим байтом данных. Так как I- и Q-каналы являются ортогональными, то они одновременно могут подвергаться МВОК. При двуортогональной модуляции используются и инвертированные векторы, что позволяет увеличить информационную скорость. Наибольшее распространение получило множество истинно ортогональных векторов Уолша с размерностью вектора кратной 2. Таким образом, применяя в качестве PN-кодов систему векторов Уолша с размерностью вектора 8 и QPSK, при скорости следования 11 мегачипов в секунду в полном соответствии со стандартом IEEE 802.11, можно в каждом канальном символе передавать 8 бит, получив скорость в канале 1,375 мегасимволов в секунду и информационную скорость 11 Мбит/с.

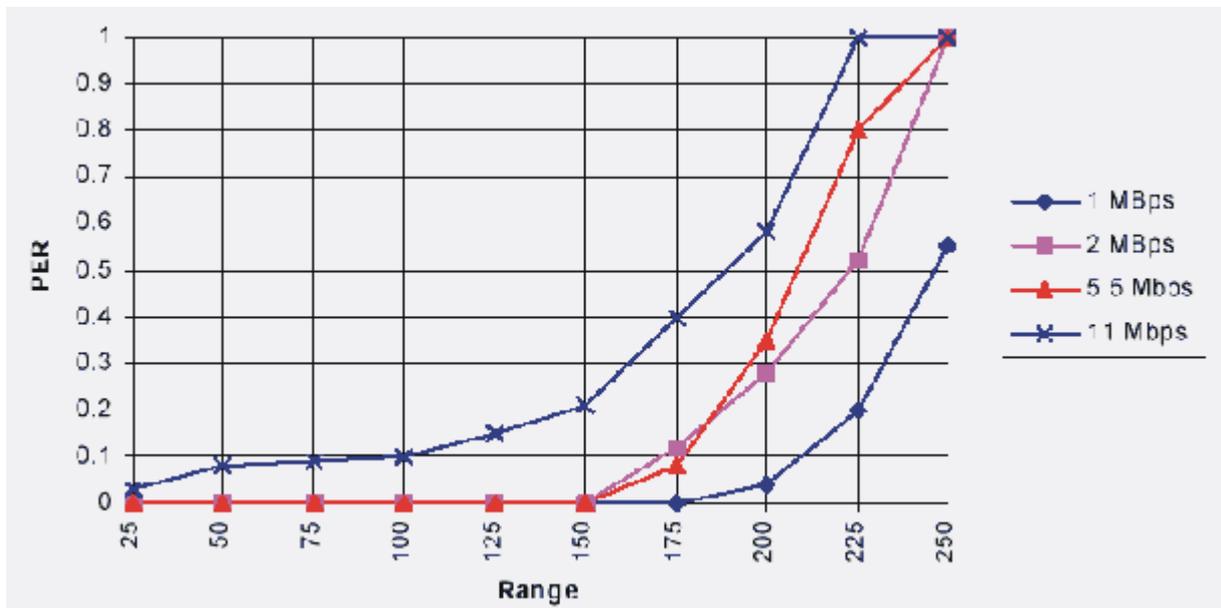
Модуляция позволяет достаточно просто организовать совместную работу с широкополосными системами, работающими со стандартной скоростью следования чипов и использующими только QPSK. В этом случае передача заголовка кадра происходит со скоростью в 8 раз меньшей (в каждом конкретном случае), что позволяет менее скоростной системе корректно воспринять этот заголовок. Затем происходит увеличение скорости передачи данных.

1. Входные данные
2. Скремблер
3. Мультиплексор 1:8
4. Выбор одной из 8 функций Уолша
5. Выбор одной из 8 функций Уолша
6. Выход I-канала
7. Выход Q-канала

Теоретически МВОК имеет несколько меньший коэффициент ошибок (BER) по сравнению с BPSK при том же самом отношении  $E_b/N_0$  (из-за свойств кодирования), что делает эту модуляцию наиболее эффективной по использованию энергии сигнала. В BPSK каждый бит обрабатывается независимо от другого, в МВОК распознается символ. Если он распознан неправильно, то это не значит, что все биты этого символа приняты ошибочно. Таким образом, вероятность принятия ошибочного символа не равна вероятности принятия ошибочного бита.

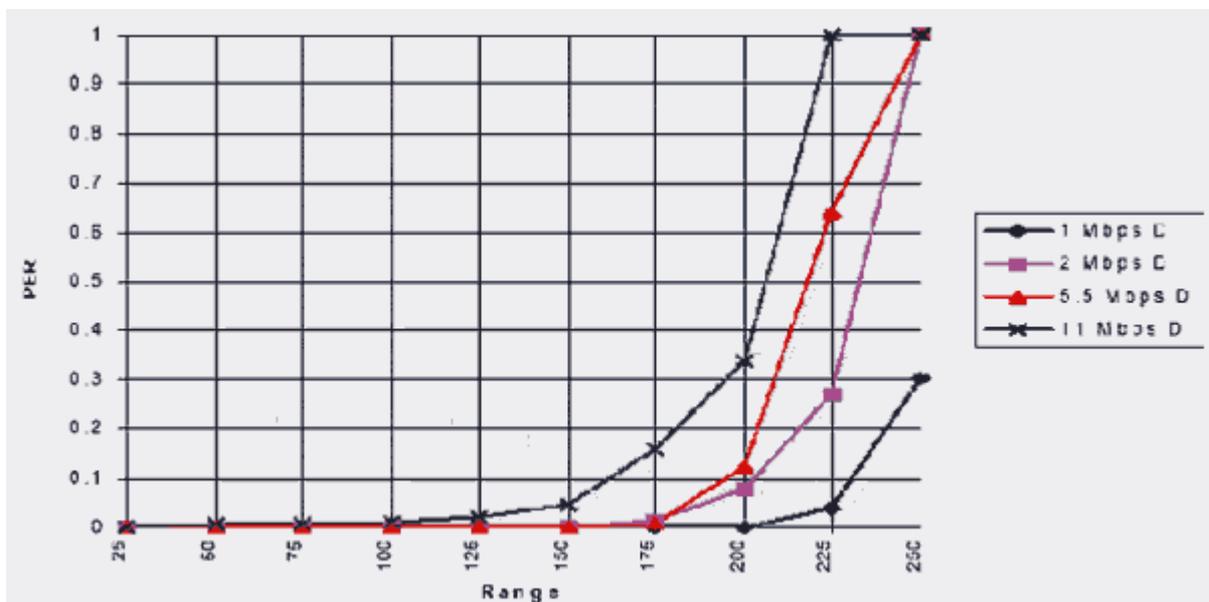
Спектр МВОК модулированных сигналов соответствует установленному в стандарте IEEE 802.11. В настоящее время фирма Aironet Wireless Communications, Inc. предлагает беспроводные мосты для сетей Ethernet и Token Ring, использующие технологию DSSS/МВОК и передающие информацию в эфир со скоростью до 4 Мбит/с.

Устойчивость к многолучевому распространению зависит от соотношения  $E_b/N_0$  и фазовых искажений сигнала. Численное моделирование передачи широкополосных сигналов с МВОК модуляцией, проведенное инженерами Harris Semiconductor внутри зданий подтвердило, что такие сигналы достаточно устойчивы к этим мешающим факторам<sup>1</sup>. См.: Andren C. 11 Mbps Modulation Techniques // Информационный бюллетень Harris Semiconductor. 05/05/98.



На рис. 3 представлены графики зависимости вероятности принятия ошибочного кадра данных (PER) от расстояния при излучаемой мощности сигнала 15 дБ/МВт (для 5,5 Мбит/с - 20 дБ/МВт), полученные в результате численного моделирования, для различных информационных скоростей передачи данных.

Моделирование показывает, что с увеличением  $E_s/N_0$ , необходимого для надежного распознавания символа, существенно увеличивается PER в условиях сильного переотражения сигнала. Для устранения этого можно применять согласованный прием несколькими антеннами. На рис. 4 представлены результаты для данного случая. При оптимальном согласованном приеме PER будет равен квадрату PER несогласованного приема. При рассмотрении рис. 3 и 4 необходимо помнить, что при PER=15% фактическая потеря в информационной скорости составит 30% вследствие необходимости повторной передачи сбойных пакетов.



Необходимым условием применения QPSK совместно с МВОК является когерентная обработка сигнала. На практике это достигается приемом преамбулы и заголовка кадра с использованием

BPSK для настройки фазовой петли обратной связи. Однако все это, как и использование последовательных корреляторов для когерентной обработки сигнала, увеличивает сложность демодулятора.

### **CCSK-модуляция**

Широкополосные сигналы, получаемые методом прямой последовательности с M-ичной ортогональной модуляцией и модуляцией циклическими кодами, (CCSK) проще демодулировать по сравнению с MBOK, поскольку используется только один PN-код. Этот тип модуляции возникает вследствие временного сдвига корреляционного пика внутри символа. Применяя код Баркера длиной 11 и скоростью 1 мегасимвол в секунду, можно сдвигать пик в одну из восьми позиций. Оставшиеся 3 позиции не позволяют их использовать для увеличения информационной скорости. Таким способом можно передавать три информационных бита на символ. Добавляя BPSK, можно передать еще один информационный бит на символ, то есть всего 4. В итоге с помощью QPSK получим 8 информационных бит на канальный символ.

CCSK модуляция является менее эффективной, чем MOK, поскольку символы не являются истинно ортогональными (они трансортгональны). Однако циклически сдвигаемые слова Баркера обеспечивают хорошую производительность, близкую к MOK при одинаковых отношениях  $E_b/N_0$ . CCSK модуляция очень похожа на PPM. Различие состоит только в том, что в CCSK сдвиг корреляционного пика происходит за счет передачи кода Баркера с разных позиций, то есть происходит циклический сдвиг бит в кодовом слове. При PPM эффект сдвига корреляционного пика достигается задержкой передачи следующего символа или началом его передачи, когда еще не закончена передача предыдущего, что приводит к паразитной амплитудной модуляции (AM) около 6 дБ. Следовательно, CCSK обеспечивает более низкую паразитную AM и снижает стоимость усилителя мощности.

Основной проблемой для PPM и CCSK является чувствительность к многолучевому распространению, когда задержка между переотражениями сигнала превышает длительность PN-кода. Поэтому внутри помещений с такими переотражениями эти типы модуляций трудно использовать. CCSK довольно просто демодулировать и при этом нужно лишь слегка усложнить традиционную схему модулятора/демодулятора. Схема CCSK аналогична схеме MBOK модуляции совместно с QPSK (см. рис. 2), только вместо блока выбора одной из 8 функций Уолша имеется блок сдвига слова.

### **DSSS/PPM-модуляция**

Широкополосные сигналы, получаемые методом прямой последовательности с фазоимпульсной модуляцией (DSSS/ PPM), - это тип сигналов, являющийся дальнейшим развитием сигналов с расширением спектра методом прямой последовательности.

Идея фазоимпульсной модуляции для обычных широкополосных сигналов заключается в том, что прибавка в информационной скорости получается за счет изменения интервала времени между корреляционными пиками последовательных символов. Модуляция была изобретена Rajeev Krishnamoorthy и Israel Bar-David в лаборатории Белла в Нидерландах.

Текущие реализации модуляции позволяют определить восемь временных положений корреляционных импульсов в интервале следования символа (внутри интервала следования PN-последовательности). Если такая технология применяется независимо на I- и Q-каналах в DQPSK, то получается 64 (8x8) различных информационных состояний. Объединяя фазоимпульсную модуляцию с DQPSK-модуляцией, обеспечивающей два различных состояния в I-канале и два различных состояния в Q-канале, получают 256 (64x2x2) состояний, что эквивалентно 8 информационным битам на символ.

Таким образом, применение фазоимпульсной модуляции в описанной схеме позволяет увеличить информационную скорость передачи в 4 раза по сравнению с традиционным широкополосным сигналом с QPSK. Недавно компания Lucent Technologies продемонстрировала модуляцию этого типа, в которой 11-чиповые кодовые последовательности перекрывались на 3 чипа, что позволило увеличить информационную скорость передачи до 10 Мбит/с за счет усиления паразитной AM2. 2 См.: Ханас А. Новые продукты Comptek на "КОМТЕК-98" // Computer Weekly.1998. № 16.

### **DSSS/QAM-модуляция**

Широкополосные сигналы, получаемые методом прямой последовательности, с квадратурной амплитудной модуляцией (DSSS/QAM) можно представлять как классические широкополосные

сигналы с DQPSK-модуляцией, в которых информация передается еще и через изменение амплитуды. Применяя двухуровневую амплитудную модуляцию и DQPSK, получают 4 различных состояния в I-канале и 4 различных состояния в Q-канале. Модулированный сигнал можно подвергнуть еще и фазоимпульсной модуляции, что позволит увеличить информационную скорость.

Одним из ограничений применения DSSS/QAM является то, что сигналы с такой модуляцией довольно чувствительны к многолучевому распространению. Также вследствие применения одновременно и фазовой и амплитудной модуляции увеличивается соотношение  $E_b/N_0$  для получения того же значения BER, что и для MBOK.

Чтобы уменьшить чувствительность к искажениям, можно использовать эквалайзер. Но его применение нежелательно по двум причинам.

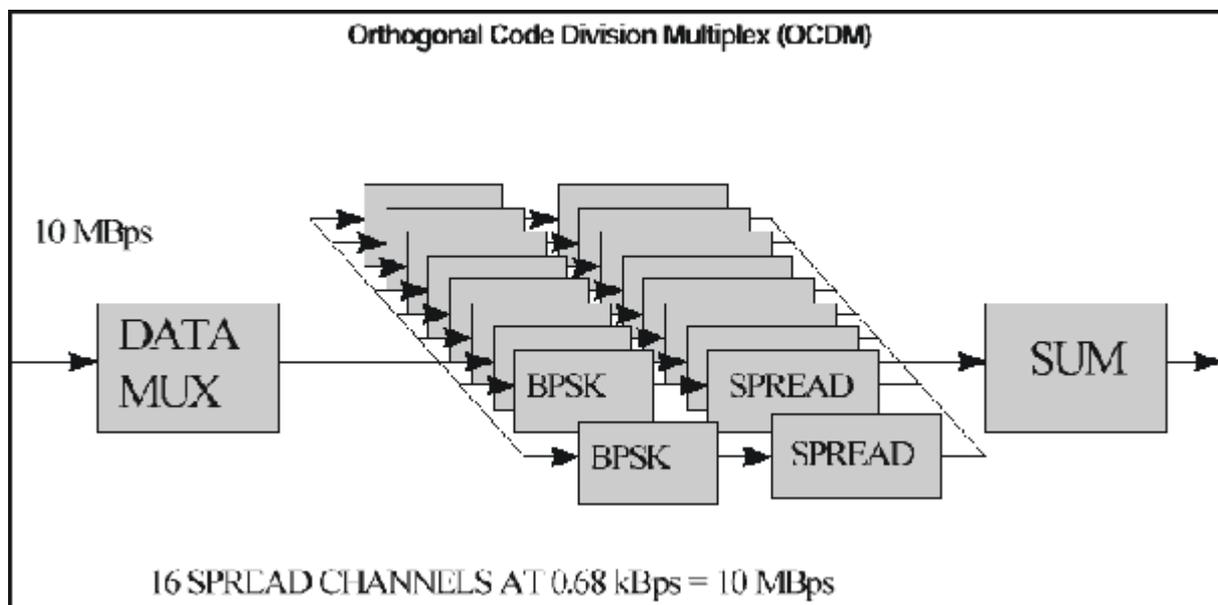
Во-первых, при этом необходимо увеличивать последовательность символов, настраивающую эквалайзер, что в свою очередь увеличивает длину преамбулы. Во-вторых, с добавлением эквалайзера возрастет стоимость системы в целом.

Дополнительная квадратурная модуляция может использоваться и в системах с Frequency Hopping. Так, фирма WaveAccess выпустила модем с торговой маркой Jaguar, который использует технологию Frequency Hopping, модуляцию QPSK совместно с 16QAM. В отличие от общепринятой в этом случае частотной FSK-модуляции это позволяет обеспечить реальную скорость передачи данных 2,2 Мбит/с. Инженеры фирмы WaveAccess считают, что применение технологии DSSS с более высокими скоростями (до 10 Мбит/с) нецелесообразно из-за незначительной дальности передачи (не более 100 м).

### ОСДМ-модуляция

В широкополосных сигналах, получаемых мультиплексированием нескольких широкополосных сигналов с ортогональным кодовым уплотнением (Orthogonal Code Division Multiplex - OCDM), используется одновременно несколько широкополосных каналов на одной частоте.

Каналы разделяются за счет применения ортогональных PN-кодов. Фирма Sharp анонсировала 10-мегабитный модем, построенный по этой технологии. Фактически одновременно передаются 16 каналов с 16-чиповыми ортогональными кодами. В каждом канале применяется BPSK, затем каналы суммируются аналоговым методом.



Вследствие суммирования независимых каналов возникает довольно сильная паразитная АМ, что требует использования линейного усилителя мощности и вызывает большее потребление энергии. OCDM имеет хороший показатель BER при заданном  $E_b/N_0$ . Сложность демодулятора примерно такая же, как и для MOK. На рис. 5 представлена схема OCDM-модулятора.

Data Mux - мультиплексор входных данных

BPSK - блок фазовой модуляции

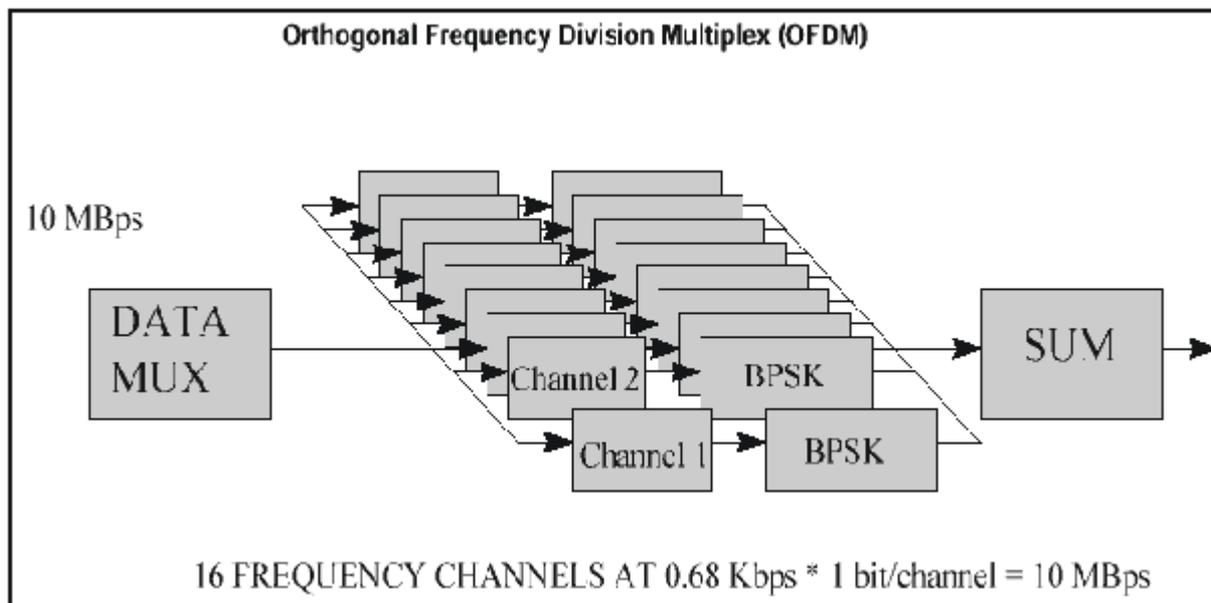
Spread - блок расширения спектра методом прямой последовательности

Sum - выходной сумматор

## OFDM-модуляция

Широкополосные сигналы, получаемые мультиплексированием нескольких широкополосных сигналов с ортогональным частотным уплотнением (Orthogonal Frequency Division Multiplex - OFDM), представляют собой одновременную передачу на разных несущих частотах сигналов с фазовой модуляцией. Модуляция описана в стандарте MIL-STD 188C. Одним из ее преимуществ является высокая устойчивость к провалам в спектре, возникающим вследствие многолучевого затухания. Узкополосное затухание может исключить одну или более несущих. Надежное соединение обеспечивается распределением энергии символа на несколько частот.

Модуляция обеспечивает наименьшую интерференцию и спектр, весьма похожий на спектр "белого шума". Длинные символы в OFDM устойчивы к многолучевому распространению. Сумма 16 независимых каналов может иметь большую паразитную АМ, что усложняет передатчик и исключает ограничение в приемнике. Обработка OFDM обычно происходит с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и инверсного БПФ, что приводит к усложнению схем декодирования по сравнению с более простым типом модуляции. Применяется OFDM в современных системах наземного цифрового ТВ-вещания (DTTV) в диапазонах ОВЧ/УВЧ, а также в устройствах беспроводного доступа к сетям АТМ (например, HyperLAN фирмы Lucent Technologies). Фирма Nova заявила о разработке по технологии OFDM модема "Information Superhighway". Модем имеет эффективность использования спектра 4 байт/с на герц в полосе 5 МГц, что достигается за счет использования свыше 500 независимо модулируемых несущих, каждая из которых подвергается 32-позиционной квадратурной амплитудной модуляции.



Это превышает спектральную эффективность аналогичной QPSK-системы в 2,5 раза. Существуют готовые микросхемы, реализующие OFDM-модуляцию. В частности, фирма Motorola выпускает OFDM-демодулятор MC92308 и "front-end" чип для OFDM MC92309. Схема типичного модулятора OFDM приведена на рис. 6.

Data mux - мультиплексор входных данных

Channel - частотный канал

BPSK - блок фазовой модуляции

Sum - сумматор частотных каналов

## Заключение

В сравнительной таблице приведены оценки каждого типа модуляции по различным критериям и итоговая оценка. Меньшая оценка соответствует лучшему показателю. Квадратурная амплитудная модуляция берется лишь для сравнения.

При рассмотрении были отброшены различные типы модуляций, имеющие неприемлемые значения оценок различных показателей. Например, широкополосные сигналы с

16-позиционной фазовой модуляцией (PSK) - вследствие плохой устойчивости к интерференции, очень широкополосные сигналы - вследствие ограничений на протяженность частотного диапазона и необходимости иметь, как минимум, три канала для совместной работы расположенных рядом радиосетей.

Среди рассмотренных типов широкополосной модуляции наиболее интересной является М-ичная двуртогональная модуляция - МВОК.

В заключение хотелось бы отметить модуляцию, которая не вошла в серию экспериментов, проведенных инженерами Harris Semiconductor. Речь идет о фильтрованной QPSK-модуляции (Filtered Quadrature Phase Shift Keying - FQPSK). Данная модуляция была разработана профессором Kamilo Feher из Калифорнийского университета и запатентована совместно с фирмой Didcom, Inc.

Для получения FQPSK применяют нелинейную фильтрацию спектра сигнала в передатчике с последующим восстановлением его в приемнике. В результате спектр FQPSK занимает примерно в два раза меньшую площадь по сравнению со спектром QPSK при прочих равных параметрах. Кроме того, PER (коэффициент ошибок при передаче пакетов) FQPSK лучше аналогичного параметра у GMSK на 10<sup>-2</sup>-10<sup>-4</sup>. GMSK - это гауссовская частотная модуляция, используемая, в частности, в стандарте цифровой сотовой связи GSM. Новую модуляцию в достаточной мере оценили и применяют в своих изделиях такие компании, как EIP Microwave, Lockheed Martin, L-3 Communications, а также NASA.

Нельзя однозначно сказать, какая именно модуляция будет использоваться в ШСПД XXI века. С каждым годом в мире растет количество информации, следовательно, все больше информации будет передаваться по каналам связи. Поскольку частотный спектр представляет собой уникальный природный ресурс, то требования к спектру, используемому системой передачи, будут непрерывно расти. Поэтому выбор наиболее эффективного способа модуляции при разработке ШСПД продолжает оставаться одним из важнейших вопросов.

**К. В. Боровков, аспирант Уральского государственного технического университета (УПИ)**

**И. Малыгин, директор Института радиотехники**

[обсудить статью](#)

© сетевые решения