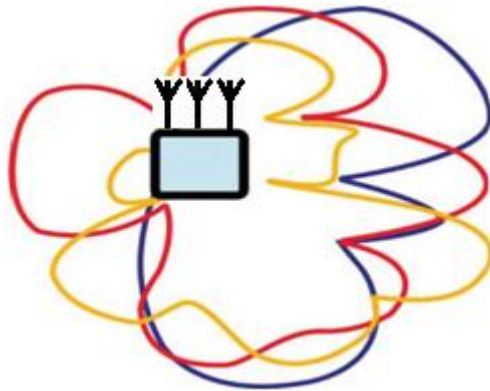


В.В. Жилин

**ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие



Воронеж 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

В.В. Жилин

ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 621.396
ББК 32.84я7
Ж721

Рецензенты:

*учебно-методический совет
Воронежского института высоких технологий;
канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко*

Жилин, В.В.

Ж721 Технологии беспроводного доступа в телекоммуникационных сис-темах: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. тексто-вые, граф. данные (1,8 Мб) / В.В. Жилин. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). цв.– Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0596-1

В учебном пособии освещены современные технологии бес-проводного абонентского доступа в объеме, достаточном для изуче-ния дисциплины «Технологии беспроводного доступа в телекомму-никационных системах». Пособие может быть полезно студентам радиотехнического профиля, изучающим курс «Технологии теле-коммуникационных систем».

Издание соответствует требованиям Федерального государ-ственного образовательного стандарта высшего образования по на-правлению 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»), дисциплине «Технологии беспроводного доступа в телекоммуникационных сис-темах».

Табл. 13. Ил. 36. Библиогр.: 13 назв.

УДК 621.396
ББК 32.84я7

ISBN 978-5-7731-0596-1 © Жилин В.В., 2018
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводной абонентский доступ занимает значительное место в повседневной жизни. Обязательной составной частью современных смартфонов, планшетов и ноутбуков являются блоки беспроводного доступа.

Мировым лидером в области разработки стандартов беспроводного доступа является организация IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Стандарты беспроводного доступа классифицируют по дальности действия следующим образом:

- 1) WPAN (Wireless Personal Area Network - беспроводная персональная сеть) - стандарты серии IEEE 802.15, (в частности, Bluetooth). Представляют собой радиоинтерфейсы для обмена на расстоянии в несколько метров (пикосети);
- 2) WLAN (Wireless Local Area Network - беспроводная локальная сеть) - стандарты серии IEEE 802.11 (так называемый Wi-Fi). Сети Wi-Fi широко распространены, размер соты - сотни метров характеризуются высокой скоростью доступа;
- 3) WMAN (Wireless Metropolitan Area Network - беспроводная сеть масштаба города) - стандарты серии IEEE 802.16, известны как Wi-MAX. Сети Wi-MAX охватывают значительную территорию - до нескольких километров. Сюда же относятся и сети на базе сотовых систем связи – 3G и LTE;
- 4) WRAN (Wireless Regional Area Network - региональная беспроводная сеть доступа) - стандарт IEEE 802.22, называемый еще когнитивное радио. Использует незадействованные каналы телевизионного вещания, эти частоты хорошо распространяются на десятки километров.
- 5) WWAN (Wireless Wide Area Network - беспроводная глобальная сеть доступа). Представлены спутниковыми технологиями и не описаны в стандартах IEEE. В них ис-

пользуются беспроводные технологии сотовой связи, такие же, как и в UMTS или WiMAX.

Обзорная характеристика стандартов беспроводного абонентского доступа представлена на рис. 1.

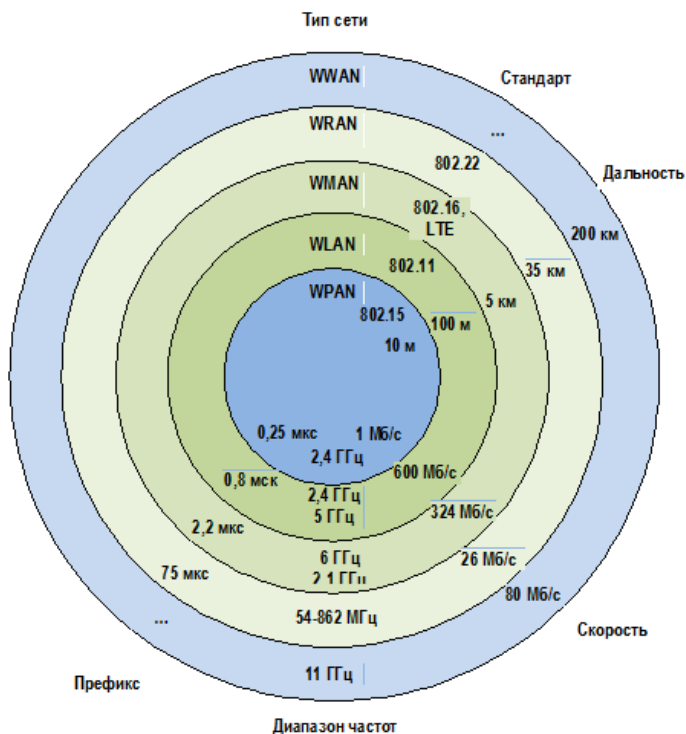


Рис. 1. Обзорная характеристика стандартов беспроводного абонентского доступа IEEE 802

Современные системы беспроводного доступа (впрочем, как и кабельные) для достижения высоких скоростей оперируют широкополосными сигналами, используют сложную обработку сигналов, опираются на пролонгацию качества канала на фрейм передачи.

Учебное пособие содержит авторские иллюстрации.

Обозначения и сокращения

3G	(англ. Third Generation - третье поколение), технологии мобильной связи 3 поколения.
3GPP	(англ. The 3rd Generation Partnership Project - проект партнерства третьего поколения), консорциум самых известных организаций по стандартизации (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC), разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии.
ADSL	(англ. Asymmetric Digital Subscriber Line - асимметричная цифровая абонентская линия), технология, используемая для несимметричного (в плане скорости к абоненту и от абонента) доступа к сети Интернет.
ATM	(англ. Asynchronous Transfer Mode - асинхронный режим передачи), телекоммуникационная высокопроизводительная технология коммутации и мультиплексирования ячеек (пакетов малой емкости).
Beamforming SU-MIMO	(англ. Beamforming SU-MIMO - формирование луча в SU-MIMO), технология пространственного мультиплексирования с адаптацией диаграммы направленности излучения под конкретного клиента.
Bluetooth	(от слов англ. blue - синий и tooth - зуб), технология семейства беспроводных персональных сетей, спецификация стандарта IEEE 802.15.
CDMA	(англ. Code Division Multiple Access - множественный доступ с кодовым разделением), технология связи, где разделение канальных ресурсов осуществляется посредством кодов.
CL-MIMO	(англ. Closed Loop MIMO - MIMO с обратной связью), разновидность технологии пространственного мультиплексирования.

CQI	(англ. Channel Quality Indicator - индикаторы качества канала), характеристика состояния радиоканала в сетях мобильной связи.
DPDCH	(англ. Dedicated Physical Data Channel - выделенный физический канал передачи данных), канал передачи данных в сетях 3G.
DVB-T	(англ. Digital Video Broadcasting - Terrestrial - цифровое видеовещание - наземное), европейский стандарт эфирного цифрового телевидения, спецификация стандарта DVB.
EDGE	(англ. Enhanced Data rates for GSM Evolution - расширенные скорости передачи данных для развития GSM), цифровая технология беспроводной передачи данных для мобильной связи, которая функционирует как надстройка над 2G.
ETSI	(англ. European Telecommunications Standards Institute - Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций), независимая некоммерческая организация по стандартизации в телекоммуникационной промышленности в Европе.
FDD	(англ. Frequency Division Duplex - частотный разнос входящего и исходящего канала), метод организации дуплекса в связи.
FPC	(англ. Facility Power Control - управление мощностью оборудования), технология управления мощностью излучения в радиоканале сетей LTE.
GSM	(англ. Global System for Mobile Communications - глобальная система мобильной связи), стандарт сотовой связи 2-го поколения.
HARQ	(англ. Hybrid Automatic Repeat Request - система повторной передачи), технология сетей LTE, повышающая качество связи.
IEEE	(англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers - Институт инженеров по электротехнике и радио-

	электронике), - мировой лидер в области разработки стандартов по радиоэлектронике, электротехнике и аппаратному обеспечению вычислительных систем и сетей.
IEEE 802	группа стандартов семейства IEEE, касающихся локальных вычислительных сетей (LAN) и сетей мегаполисов (MAN).
ISI	(англ. Inter Symbol Interference - межсимвольная интерференция), вид искажения сигнала при передаче в условиях многократных отражений.
LTE	(англ. Long-Term Evolution - долговременное развитие), часто обозначается как 4G, стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильных устройств.
MIMO	(англ. Multiple-Input, Multiple-Output - множественный вход, множественный выход), технология пространственного мультиплексирования при передаче данных.
MU-MIMO	(англ. Multi User MIMO - многопользовательский MIMO), разновидность технологии пространственного мультиплексирования при передаче данных.
OFDM	(англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием), метод формирования сигнала для передачи в среде с многочисленными отражениями и частотно-селективным затуханием.
OSI	(англ. Open Systems Interconnection - модель взаимодействия открытых систем), базовая модель, определяющая уровни взаимодействия систем в сетях с коммутацией пакетов.
PoE	(англ. Power over Ethernet - питание по Ethernet), технология, позволяющая передавать удалённому устройству электрическую энергию вместе с

	данными через стандартную витую пару в сети Ethernet.
QAM	(англ. Quadrature Amplitude Modulation - квадратурная амплитудная модуляция), разновидность амплитудной модуляции сигнала, которая представляет собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, но сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90° , она же КАМ.
QoS	(англ. Quality Of Service - качество обслуживания), технология предоставления различным классам трафика различных приоритетов в обслуживании.
QPSK	(англ. Quadrature Phase Shift Keying - квадратурная фазовая манипуляция), или 4-PSK, метод модуляции, базирующийся на созвездии из четырёх точек, размещённых на равных расстояниях на окружности.
RN	(англ. Relay Nodes - транзитный узел), технология релейного режима включения базовых станций в сетях LTE.
SAE	(англ. System Architecture Evolution - эволюция системной архитектуры), структура ядра сети LTE.
SC-FDMA	(англ. Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access - мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов на одной несущей), метод формирования сигнала для передачи в среде с многочисленными отражениями.
SU-MIMO	(англ. Single User MIMO - однопользовательский MIMO), разновидность технологии пространственного мультиплексирования при передаче данных.
TDD	(англ. Time Division Duplex - временной разност входящего и исходящего канала), метод организации дуплекса в связи.
TDMA	(англ. Time Division Multiple Access - множест-

	венный доступ с разделением по времени) - способ использования радиочастот, когда полосу частот используют несколько абонентов в режиме разделения времени.
UMTS	(англ. Universal Mobile Telecommunications System - универсальная мобильная телекоммуникационная система), технология сотовой связи, разработана ETSI для внедрения сетей 3G в Европе.
UTRAN	(англ. Universal Terrestrial Radio Access Network - универсальная наземная сеть радиодоступа), структура сети UMTS.
UWB	(англ. Ultra-Wide Band - сверхширокая полоса), беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, использующая в качестве несущей сверхширокополосные сигналы, спецификация стандарта IEEE 802.15.4a/b.
VLC	(англ. Visible Light Communication - связь по видимому свету), технология передачи информации посредством видимого света при наличии освещенности.
WCDMA	(англ. Wideband Code Division Multiple Access - широкополосный множественный доступ с кодовым разделением), технология связи, где разделение канальных ресурсов осуществляется посредством кодов, а ширина канала значительно превышает требуемую для передачи голоса.
Wi-MAX	(англ. Worldwide Interoperability for Microwave Access - международное взаимодействие для микроволнового доступа), телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра устройств, базируется на стандарте IEEE 802.16.

WLAN	(англ. Wireless Local Area Network - беспроводная локальная сеть), разновидность сети доступа.
WMAN	(англ. Wireless Metropolitan Area Network - беспроводная сеть масштаба города), разновидность сети доступа.
WPAN	(англ. Wireless Personal Area Network - беспроводная персональная сеть), разновидность сети доступа.
ZigBee	Технология семейства беспроводных персональных сетей, спецификация стандарта IEEE 802.15, предназначена для радиоустройств, где необходима длительная работа от батареек и безопасность передачи данных по сети.

1. Факторы, определяющие скорость в сетях беспроводного доступа

Актуальными для сетей беспроводного доступа являются следующие факторы, определяющие скорость доступа:

- распространение в среде общего пользования;
- многолучевая интерференция;
- Доплеровский эффект;
- частотно-зависимое затухание.

1.1. *Распространение в среде общего пользования*

Распространение сигнала в среде общего пользования - атмосфере сопровождается существенными искажениями. Причинами появления которых являются:

- помехи от лицензированных передатчиков, расположенных на удаленных территориях,
- атмосферные помехи,
- помехи от электрооборудования,
- затухание сигнала пропорционально квадрату расстояния,
- поглощение энергии сигнала компонентами атмосферы (газы, влажность, запыленность).

Перечисленные факторы приводят к ухудшению радиосигналов любой частоты и мощности.

1.2. *Многолучевая интерференция*

Многолучевая интерференция приводит к существенному искажению радиосигнала.

Многолучевое распространение возникает вследствие прохождения сигнала от антенны передатчика к антенне приемнику по нескольким маршрутам, появлению которых способствуют многократные отражения от препятствий на пути распространения. Траектории сигналов складываются естественным образом, имеют различную протяженность, а значит и – время прохождения (последний параметр называют задерж-

кой сигнала). В приемной антенне происходит наложение пришедших сигналов, вследствие чего каждая из реплик сигнала значительно искажается. Каждое отражение от препятствия приводит к уменьшению мощности сигнала на 10-12 дБ, т.е. даже после трех отражений радиосигнал имеет достаточную мощность и вполне может быть распознан.

Многолучевая интерференция наиболее значительно искажает широкополосные сигналы. Причиной является то, что при широкой полосе сигнала одни частоты в результате интерференции суммируются (т.к. приходят синфазно), а другие, пришедшие иным маршрутом (и задержанные на пол волны) вычитаются, ослабляя сигнал на этой частоте.

Многолучевая интерференция имеет два варианта негативного воздействия на сигнал:

- 1) внутри символьная интерференция, когда задержка между репликами сигналами не превышает длительности символа, и искажения происходят в пределах одного символа,
- 2) межсимвольная интерференция (ISI, inter symbol interference), когда задержка между репликами сигналами больше длительности символа, что приводит к искажению различных (обычно – соседних) символов.

Последняя наиболее пагубно влияет на передачу сигнала, т.к. изменяются все параметры сигнала - амплитуда и фаза, и восстановить такой сигнал крайне сложно. Влияние межсимвольной интерференции представлено на рис. 2: для наглядности использован случай, когда после серии нулей идет одиночная единица или одиночный ноль после серии единиц.

Наиболее распространенными способами борьбы с межсимвольной интерференцией являются адаптивная компенсация или коррекция искажений и использование кодов коррекции ошибки для последующего восстановления искаженных символов на приемной стороне.

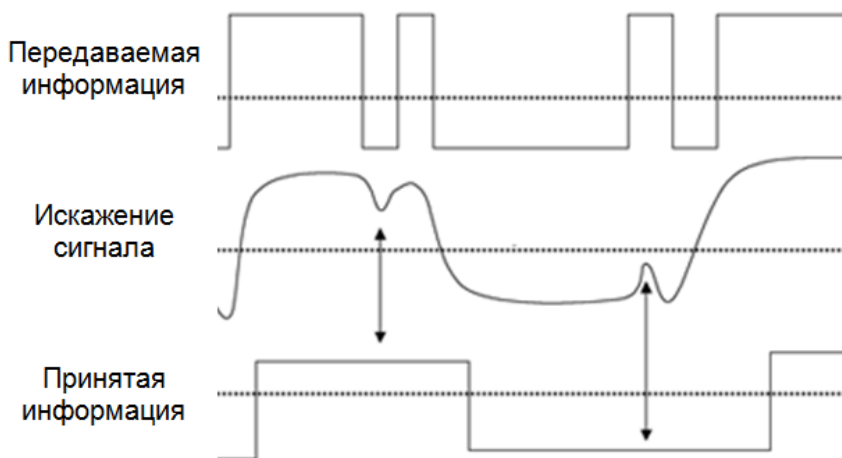


Рис. 2. Искажение сигнала под влиянием межсимвольной интерференции

1.3. Частотно-зависимое затухание

Прохождение широкополосного сигнала от передатчика к приемнику сопровождается еще одним типом искажения - частотно-зависимое затухание. Вследствие отражений широкополосного сигнала от препятствий, имеющих частотно-зависимые поглощающие свойства, а так же резонансных свойств газов, наполняющих атмосферу, пр., отдельные частоты передаваемого широкополосного сигнала значительно затухают, не позволяя распознать передаваемую информацию (рис. 3). Поверхности препятствия свойственно в той или иной степени отражать и поглощать электромагнитные волны различной частоты излучения. Траектории распространения сигнала в условиях плотной городской застройки (следовательно, многократных отражений) не предсказуемы; состояние атмосферы (состав, плотность газов, запыленность, влажность) динамически меняется. Таким образом, частотно-зависимые искажения широкополосного сигнала не прогнозируемые.

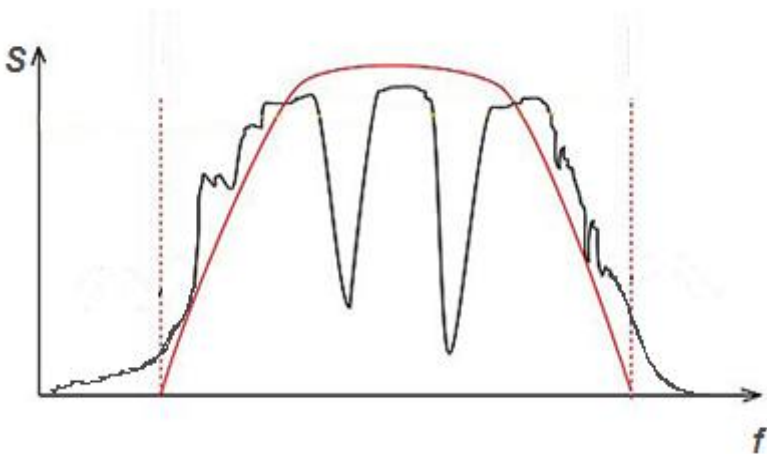


Рис. 3. Искажение сигнала при отражении от препятствий

Эффективным противостоянием частотно-селективному затуханию широкополосного сигнала является ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием (OFDM - англ. Orthogonal frequency-division multiplexing).

1.4. Доплеровский эффект

Эффект Доплера возникает вследствие движения приемника (или передатчика) и проявляется в том, что частота принимаемых колебаний будет увеличиваться при сближении приемник и передатчика, и уменьшаться при удалении. Величина сдвига частоты $\pm F_d$ принимаемого сигнала зависит от скорости движения v , частоты сигнала F_0 и угла α между направлением на передатчик и направлением движения:

$$F_d = v \cdot F_0 \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Движение абонента (по направлению и скорости) не предсказуемы, кроме того наличие неровностей рельефа местности приводит к изменению частоты, а так же амплитуды и фазы принимаемого сигнала по случайному закону. Непредсказуемые изменения частоты сигнала рассматривают как паразитную девиацию частоты и называют доплеровским рас-

сеянием. Доплеровское рассеяние приводит к нестабильному во времени "размазыванию" спектра передаваемого сигнала, вследствие чего когерентный прием сопровождается частотными искажениями.

Случайные изменения амплитуды и фазы, вызванные рельефом местности, приводят к селективным замираниям сигнала. Для их характеристики введен параметр время когерентности $C_d = 1/F_d$, воспринимаемое как интервал времени, в течение которого коэффициент корреляции огибающей не превышает 0,9.

Таким образом, на искажение широкополосного радиосигнала при его распространении в атмосфере оказывают влияние следующие основные факторы:

- влияние помех;
- ослабление при увеличении расстояния;
- затухание в атмосфере;
- межсимвольная интерференция;
- частотно-зависимое затухание;
- Доплеровский эффект.

2. Методы увеличения скорости беспроводного канала доступа

2.1. Пропускная способность радиоканала

Пропускная способность аналогового радиоканала связи, искажённого гауссовским шумом (как, впрочем, и кабельного), т.е. теоретическая верхняя граница скорости передачи данных, определяется теоремой Шеннона-Хартли:

$$C = B \log_2 (1 + S/N), \quad (2)$$

где C - пропускная способность канала, б/с; B - ширина полосы канала, Гц; S - полная мощность сигнала над полосой пропускания, Вт; N - полная шумовая мощность (аддитивный бе-

льный гауссовский шум) над полосой пропускания, Вт; S/N - отношением сигнал-шум, дБ.

В формуле 2 параметры S и B определены (детерминированы) передатчиком, параметр N является свойством среды распространения. Таким образом, скорость передачи информации в радиоканале фактически определяется значением полной шумовой мощности над полосой пропускания (или, проще, уровня шума).

Однако уровень шума на местности не постоянен во времени. Системы широкополосного беспроводного доступа, как правило, используют (в частности) временное разделение сигналов (т.е. разбиение потока на тайм-слоты), причем, достаточно малые (менее 1 мс), чтобы уровень шума мог изменить значение. Именно это обстоятельство и используется в сетях беспроводного доступа для повышения скорости передачи информации в моменты времени, когда уровень шума мал.

Теорема Шеннона-Хартли справедлива при передаче битовой информации. Для более сложных сигналов, несущих несколько бит информации в единицу времени, т.е. символов, скорость передачи будет выше. Современные сети беспроводного доступа для увеличения пропускной способности беспроводного канала связи оперируют комбинированием двух основных методов подготовки сигнала:

- метод кодового разделения CDMA, заключающийся в замещении бита информации ортогональной чиповой последовательностью;
- квадратурная амплитудная модуляция (КАМ), заключающаяся в замещении бита полезной информации символом, несущим несколько бит информации.

Выбор того или иного метода подготовки сигнала осуществляется передающим оборудованием на основе анализа качества канала (т.е. сигнал/шум). Передающее оборудование постоянно мониторит частотно-временной канал, предназначенный для передачи, с целью определения его качества. В те

тайм-слоты, когда качество канала связи хорошее, передающее оборудование может передавать информацию с более высокой скоростью.

Учет условий распространения радиоволн в канале связи и адаптация к ним путем выбора наиболее подходящей схемы модуляции и кодирования обеспечивают максимальную пропускную способность сети доступа. Для примера, в LTE точность определения требуемой излучаемой мощности составляет 0,5 дБ, а количество возможных схем модуляции и кодирования - 29.

2.2. Множественный доступ с кодовым разделением CDMA

Суть метода множественного доступа с кодовым разделением CDMA заключается в замене битового интервала уникальной чиповой последовательностью, слабо коррелированной с другими, используемыми в этой же соте чиповыми последовательностями. Каждому потоку (абоненту) присваивается своя чиповая последовательность. Для распознавания переданного бита используется корреляционная обработка поступившего в антенну приемника сигнала. Передача сигнала CDMA осуществляется одновременно на одной и той же частоте в той же местности (соте), но с различной чиповой последовательностью у каждого потока (абонента). Математическая модель распознавания такого сигнала показывает, что даже при значительном уровне шума корреляционная обработка дает высокое значение опознания передаваемого бита.

Рассмотрим принцип кодового разделения каналов (рис. 4).

Информационный поток представлен биполярным сигналом $u(t)$ (рис. 4а), т. е. последовательностью логических нулей и единиц с уровнями -1 и +1. Для простоты рассмотрения возьмем чиповую последовательность, состоящую из 8 чипов (рис. 4б), на практике ее длина может быть от 4 до 512. Для формирования сигнала CDMA каждый бит умножаем на биполярную кодовую последовательность $c(t)$, такую, что на каждый информационный бит приходится m бит (чипов) кодовой

последовательности, результат умножения - последовательность $v(t)=u(t)*c(t)$ (рис. 4в). Полученная последовательность и отправляется в канал связи. В приемнике принятый сигнал вновь умножаем на последовательность $c(t)$, т.е. производим корреляционную обработку, и в результате получаем $u_{np}(t)=...= u(t)$ (рис. 4г). Для достоверности опознавания бита проводят интегрирование сигнала $u_{np}(t)$ на интервале передачи каждого бита, в конце интервала ($u_{инт}(t)$, рис. 4д) оценивается значение интеграла.

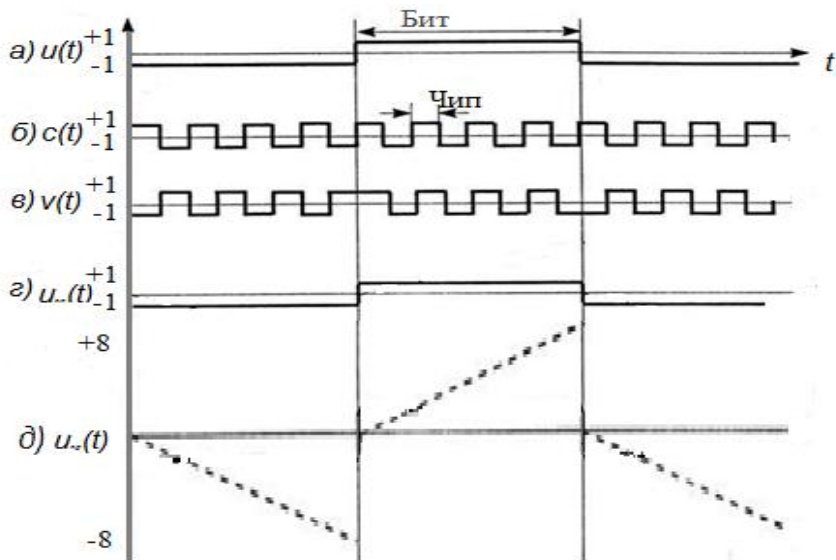


Рис. 4. Принцип кодового разделения

Чтобы использовать длинную чиповую последовательность, требуется достаточно широкий канал связи. В CDMA ширина канала - от 1,23 МГц. Теоретически метод CDMA позволяет работать со слабыми сигналами, сравнимыми с уровнем шума, однако для этого потребуются очень длинная чиповая последовательность.

Следует отметить, что реализация технологии CDMA сопровождается сильной взаимной интерференцией между ка-

налами связи, и способна привести к полной деградации системы абонентского доступа при увеличении количества активных абонентов.

2.3. Модуляция КАМ

Цифровая модуляция – это процесс преобразования потока информационных символов в последовательность элементов сигнала. Отметим, что модуляция – непрерывный процесс, манипуляция – дискретный процесс. В соответствии с элементом сигнала различают несколько типов манипуляций:

- частотная,
- фазовая,
- амплитудная.

Частотная манипуляция имеет высокую помехоустойчивость, т.к. помехи искажают в основном амплитуду, а не частоту сигнала. Поскольку при частотной манипуляции значение бита («0» или «1») передаются определенными наборами частот, то полоса канала не эффективно используется.

Фазовая манипуляция (ФМ) - фаза несущего колебания принимает то или иное значение в зависимости от значения бита передаваемого потока.

Амплитудная манипуляция - амплитуда несущего колебания дискретно меняется в соответствии со значением бита передаваемой информации.

Разновидностью амплитудной модуляции сигнала является квадратурная (амплитудная) модуляция (КАМ), представляющая собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, но смещенных по фазе относительно друг друга на 90° . Каждая несущая промодулирована согласно значению битового потока по амплитуде, выходное колебание представляет собой:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (3)$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ - модулирующие сигналы, f_0 - несущая частота.

Квадратурная амплитудная модуляция является наиболее эффективным способом модуляции с точки зрения эффективности использования частотного ресурса.

Впервые КАМ модуляция использована в сетях 3-го поколения - технологии EDGE. Замена Гауссовой частотной модуляции с минимальным сдвигом фаз (ЧММС) на 8ФМ (разновидность КАМ) позволило увеличить скорость передачи информации в 3 раза. Информационная суть сигнала 8ФМ представлена на рис. 5: 8ФМ имеет 8 состояний сигнала, характеризующихся значением амплитуды и фазы.

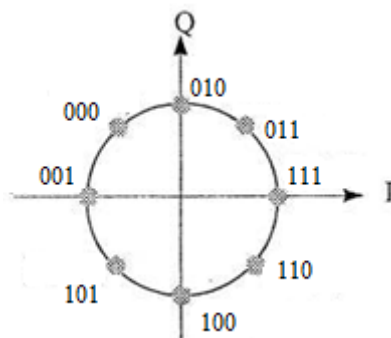


Рис. 5. Модуляция 8-ФМ

Каждому состоянию ставится в соответствие комбинации из 3 бит, чем и обеспечивается увеличение скорости передачи.

При модуляции 8ФМ состояния сигнала значительно меньше отличаются друг от друга, чем при Гауссовской ЧММС, соответственно, шум в канале приведет к большим вероятностям ошибочного распознавания сигнала. Это есть причина использования 8ФМ в каналах с более высоким отношением сигнал/помеха. В частности, в GSM (скорость речевого потока 9 кб/с) необходимое защитное отношение сигнал/помеха составляет 9 дБ, а при применении 8ФМ (в EDGE) необходимое защитное отношение возрастает до 15-17 дБ.

Квадратурная амплитудная модуляция нашла применение во многих средствах передачи информации: и на базе радиоканалов и на базе кабельных каналов, поскольку без расширения спектра сигнала скорость в канале может быть увеличена в несколько

раз. Усложняется лишь обработка сигнала на передаче и на приеме, и накладывается ограничение – использование КАМ-сигналов возможно лишь в те моменты времени (тайм-слоты), когда соотношение сигнал/помеха велико (т.е. канал – «чистый») и ограничена скорость перемещения абонента (т.е. не значительно воздействие доплеровского эффекта). В настоящее время выпускается оборудование доступа с модуляцией вплоть до 512-КАМ.

2.4. Формирование и свойства КАМ-сигналов

Отличие квадратурной амплитудной манипуляции (QAM, КАМ) от обычной квадратурной манипуляции (её называют комплексная амплитудная модуляция) заключается в том, что изменяется как фаза, так и амплитуда сигнала. Это позволяет увеличить количество информации, передаваемой одним состоянием сигнала.

Квадратурная амплитудная модуляция характеризуется теми же свойствами, что и гармоническая амплитудная модуляция:

- ширина спектра КАМ-сигнала равна ширине спектра модулирующего сигнала;
- спектр КАМ-сигнала расположен на несущей частоте.

Модуляция 4КАМ формирует сигнал изменением фазы несущей частоты с шагом $\pi/2$. Этот вид модуляции имеет отдельное название QPSK (Quadrature Phase Shift Keying - квадратурная фазовая манипуляция). Модуляция nФМ является частным случаем nКАМ, используют лишь два уровня модуляции 8ФМ и 16ФМ. Число перед «КАМ» означает количество возможных состояний сигнала (значение амплитуды и фазы). Широкое распространение получили модуляции более высоких уровней 16КАМ, 32КАМ, 64КАМ, 128КАМ и 256 КАМ.

Отметим, что в отличии от фазовой модуляции (например, 16ФМ), при квадратурной амплитудной модуляции (16КАМ) того же уровня достигается большое расстояние между соседними точками в плоскости IQ, распределяются точки

более равномерно, что способствует снижению ошибок приема данных.

В то время, когда можно передавать больше бит на символ, уровни энергии остаются теми же, а точки на диаграмме должны быть ближе друг к другу, и передача становится более восприимчивой к шуму. Это приводит к более высокой вероятности ошибки, чем для более низких уровней КАМ. Таким образом, существует баланс между получением высоких скоростей передачи данных и поддержания приемлемой скорости битовых ошибок для любой системы радиосвязи.

Формирование КАМ-сигнала заключается в представлении выходного сигнала Z линейной комбинацией двух ортогональных составляющих – синусоидальной Q и косинусоидальной I (рис. 6). Упрощенная структурная схема формирователя КАМ-сигнала приведена на рис. 6.

Устройство, формирующее КАМ-сигнал, называют квадратурным модулятором. Работу квадратурного модулятора рассмотрим на примере формирования 4ФМ сигнала (рис. 7).

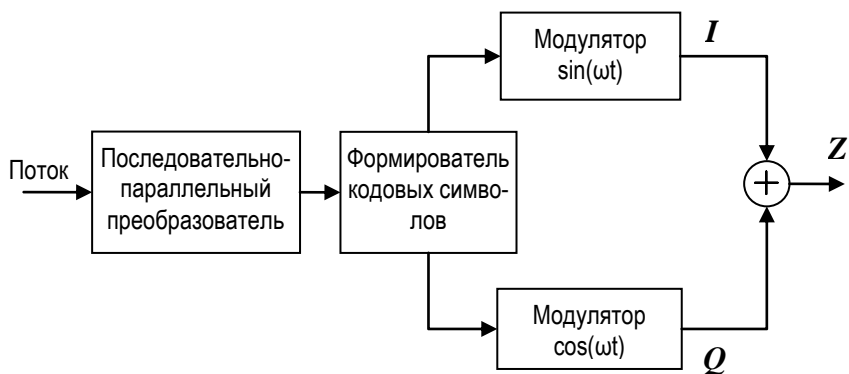


Рис. 6. Структурная схема формирователя КАМ-сигнала

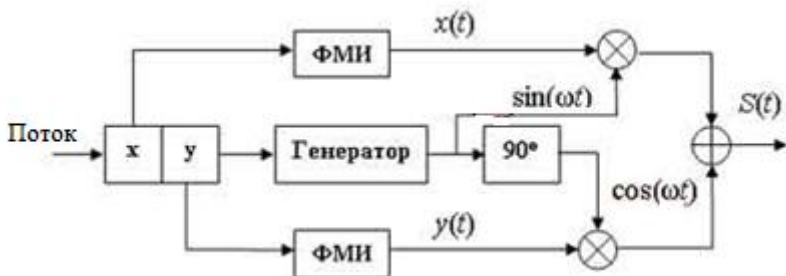


Рис. 7. Схема квадратурного модулятора 4ФМ

Регистр сдвига разделяет входной поток битовых символов длительностью T на два: y и x , которые поступают на формирователи манипулирующих импульсов (ФМИ). С ФМИ потоки биполярных импульсов $x(t)$ и $y(t)$, характеризующиеся амплитудой $\pm Um$ и длительностью $2T$, поступают на входы канальных перемножителей. Генератор создает несущую частоту, которая поступает на синфазный $\sin\omega t$ и квадратурный $\cos\omega t$ (сдвинутый по фазе на 90° , т.е. находящихся в квадратуре) каналы. Перемножители модулируют по амплитуде эти несущие колебания манипулирующими импульсами, в результате, на их выходах формируются двухфазные $(0, \pi)$ ФМ колебания. Сумматор выполняет сложение модулированных синфазного и квадратурного сигналов, результатом чего является выходной 4ФМ (или квадратурный) сигнал. Поскольку в каждом из двух каналов выполняется амплитудная манипуляция, то этот вид модуляции называют еще квадратурной амплитудной манипуляцией или просто квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Принято КАМ-сигнал представлять в геометрическом виде: вектором в сигнальном пространстве. Концы векторов являются сигнальными точками, координаты которых определяются значениями $x(t)$ и $y(t)$. Совокупность сигнальных точек называют сигнальным созвездием.

Структурная схема модулятора 16КАМ и его сигнальное созвездие представлены на рис. 8. Созвездие содержит 16

сигнальных точек, которые принимают значения $\pm 1, \pm 3$. Каждой точке поставлено в соответствие четыре передаваемых информационных бита.

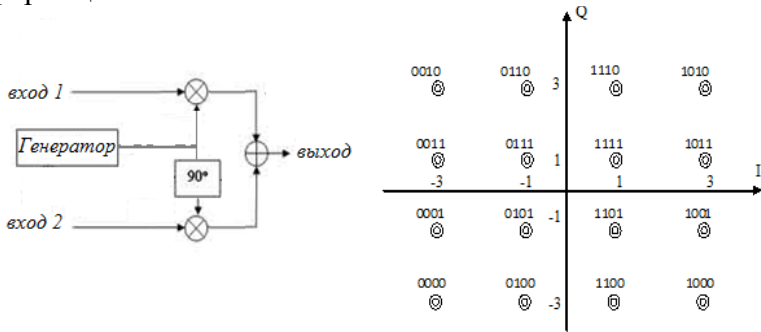


Рис. 8. Схема модулятора и сигнальное созвездие 16КАМ

В общем случае, для модуляции, поддерживающей m амплитудных уровней для каждого потока двоичных символов, можно сопоставить 2^m различных наборов нуля и единицы.

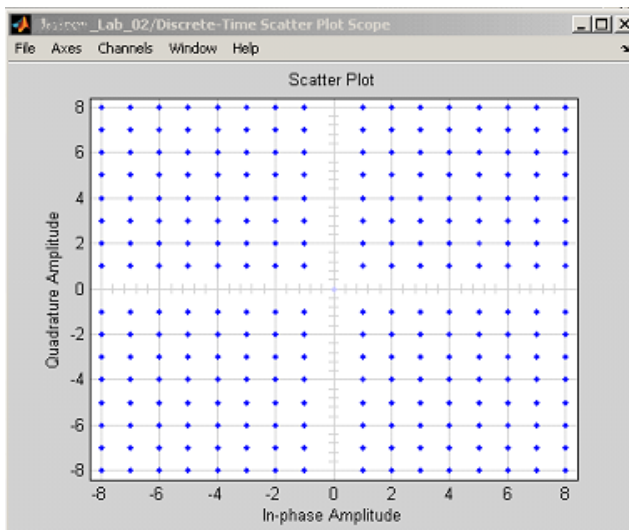


Рис. 9. Сигнальное созвездие 256КАМ

На рис. 9 показано сигнальное созвездие для 256КАМ, сформированное в пакете имитационного моделирования Simulink. Для 256КАМ требуется 16 амплитудных уровней для каждого потока.

Анализ спектров сигналов КАМ и сигналов ФМ показывает, что при равном числе точек в сигнальном созвездии спектры сигналов одинаковы. Однако сигналы ФМ и КАМ имеют различную помехоустойчивость: сигналы КАМ имеют лучшую помехозащищенность, чем сигналы ФМ. Геометрическая трактовка сигналов показывает, что расстояние d между сигнальными точками в ФМ при одинаковой нормированной мощности сигнала меньше расстояния между сигнальными точками в КАМ (рис. 10).

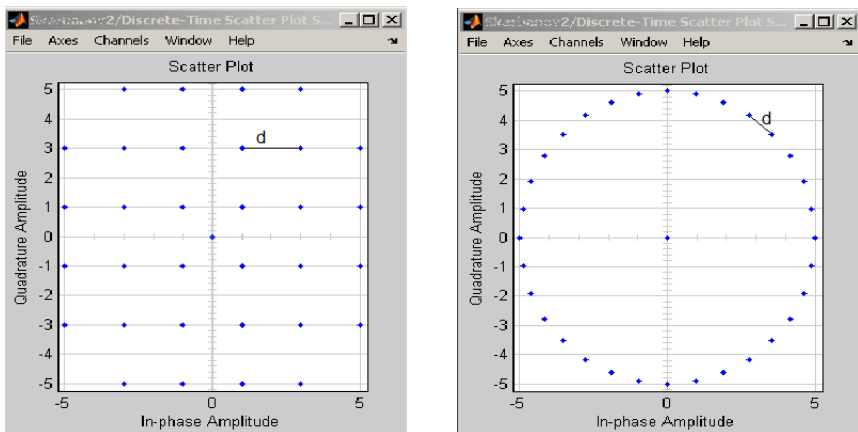


Рис. 10. Сигнальные созвездия 16 КАМ и 16 ФМ

Расстояние d между соседними точками сигнального созвездия для КАМ-сигнала с L уровнями модуляции определяется выражением: $d = \sqrt{2} / (L - 1)$.

Аналогично для ФМ: $d = 2 \sin(\pi / M)$, где M - число фаз.

Так, например:

- при $L=4$ и $M=16$ получаем $d_{\text{кам}}=0,471$ и $d_{\text{фм}}=0,390$,
- при $L=6$ $M=32$ имеем $d_{\text{кам}}=0,283$, $d_{\text{фм}}=0,196$.

С увеличением порядка модуляции возрастает скорость передачи информации, то есть сигнал может нести больше бит информации на символ. Число бит, передаваемых одним состоянием, определяется $N = \log_2 L$, где L – уровень модуляции. В табл. 1 приведены резюме скоростей различных видов КАМ.

Увеличение скорости передачи данных при увеличении порядка модуляции происходит в ущерб помехоустойчивости. Схемы модуляции более высокого порядка значительно меньше устойчивы к шумам и помехам.

Таблица 1

Скорости различных видов КАМ

Тип модуляции	Емкость символа, бит/символ	Скорость передачи, Мб/с
16КАМ	4	26
32КАМ	5	34
64КАМ	6	41

Современные системы радиодоступа используют динамические методы адаптивной модуляции: анализируют каналные условия и выбирают схему модуляции, обеспечивающую самую высокую скорость передачи данных для заданных условий. Отслеживается уровень сигнал-шум, и, опираясь на него, оптимизируется система передачи. Таким путем достигается самая надежная передача данных, с наименьшим процентом ошибок.

Помехоустойчивость КАМ ее спектральная эффективность обратно пропорциональны. Для объяснения воспользуемся геометрической трактовкой (см. рис. 11): увеличение количества точек созвездия приводит к уменьшению расстояния d между ними. Воздействие помех в радиоканале приводит к возникновению непредсказуемых изменений амплитуды и фазы передаваемого сигнала, и, следовательно, возрастает вероятность ошибок при распознавании вектора Z . Допустимые значения амплитудных и фазовых искажений КАМ-сигнала, возникающих вследствие воздействия шума, представляют со-

бой круг диаметром d , центром которого является соответствующая точка созвездия.

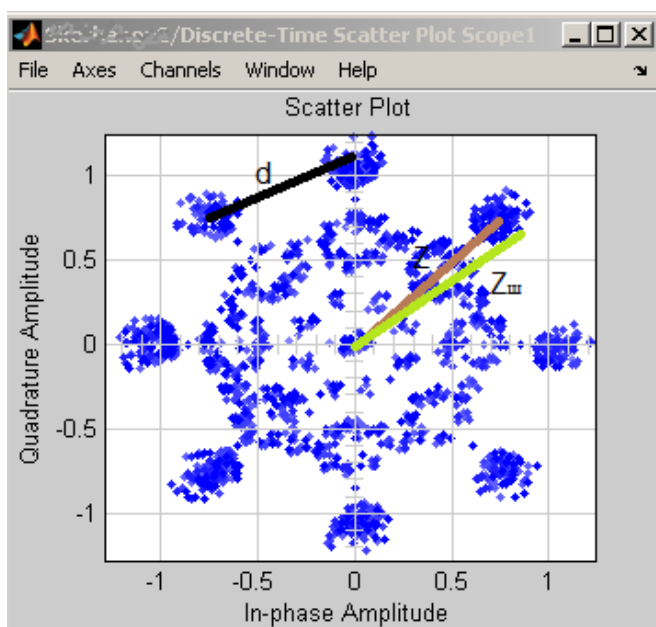


Рис. 11. Воздействие помех на КАМ-сигнал

3. Основные технологические решения обработки сигналов в сетях беспроводного доступа

3.1. Процедуры формирования сигнала в канале связи

Десятилетия развития беспроводной связи выработали достаточно эффективные методы, обеспечивающие уверенный прием широкополосного сигнала, подвергаемого изложенным ранее искажениям. В общем виде формирование сигнала в канале включает процедуры (рис. 12):

- канального кодирования,
- скремблирования,
- формирования модуляционных символов,

- их распределения по антенным портам и ресурсным элементам и,
- синтеза OFDM-символов.

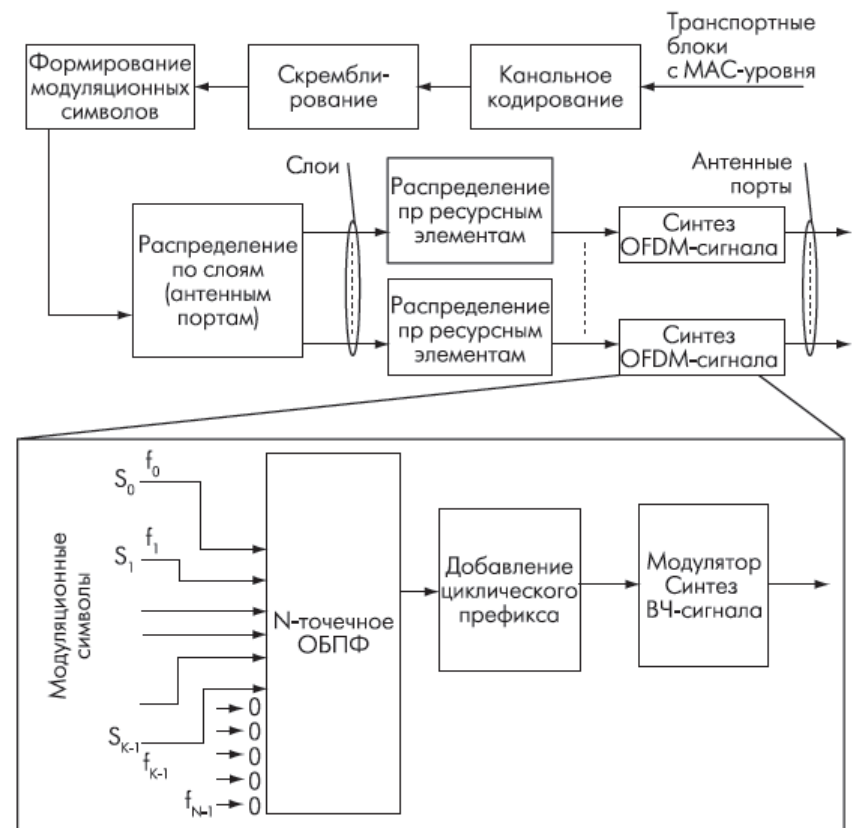


Рис. 12. Формирование сигнала в канале

Канальное кодирование подразумевает вычисление контрольных сумм для блоков данных, поступающих с MAC-уровня. Блоки с контрольными суммами подвергаются каналному кодированию (с определенной скоростью кодирования): сверточному либо блочному. Далее последовательность подвергается перемежению (интерливингу). Ошибки, возникающие вследствие воздействия помех, не одиночны по времени, а возникают пачками, т.к. длительность помехи достаточна для

возникновения ошибок в нескольких подряд идущих битах. Средства канального кодирования позволяют распознать и исправить одну-две ошибки, и не справляются с пачкой. Для борьбы с пачками ошибок в радиоканале и применяется перемежение, т.е. перестановка бит местами по известной передающей и приемной сторонам схеме.

Скремблирование повышает надёжность синхронизации канальных устройств. Скремблер выполняет сложение входной последовательности с определенной скремблирующей последовательностью (известной приемной стороне).

В результате на выходе скремблера имеем цифровой поток со свойствами случайной последовательности (т.е. появление «1» и «0» в выходной последовательности равновероятны).

Следующий шаг в обработке сигнала – процедуры формирования комплексных модуляционных символов (КАМ-сигналов), рассмотренных ранее.

Комплексные модуляционные символы и распределяются по ресурсным элементам: поднесущие, тайм-слоты и др.

В блоке OFDM происходит мультиплексирование символов на множество потоков. OFDM потоки в модуляторе преобразуются в выходной ВЧ-сигнал в заданном частотном диапазоне. Процедура OFDM обеспечивает устойчивость сигнала к временной дисперсии параметров радиоканала. С этой же целью в блоке OFDM формируется циклический префикс.

В приемнике сигнала все процедуры обработки выполняются в обратном порядке.

Рассмотрим технологические решения по обработке широкополосного сигнала, распространяющегося в условия многократных отражений.

3.2. Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием OFDM

Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием (OFDM) в настоящее время является базовой и достаточно эффективной технологией в сетях беспроводного

доступа различного масштаба, как, впрочем, и в кабельных сетях доступа.

Технологическое решения по обработке широкополосного сигнала OFDM заключается в следующем: входной высокоскоростной информационный поток разбивается на несколько низкоскоростных потоков (рис. 13), которые одновременно передаются в узких полосах подканалов (рис. 14), вписываясь при этом все в тот же частотный диапазон. Иными словами, OFDM - это методика мультиплексирования, которая подразделяет полосу канала на множество поднесущих частот, каждая из которых несет свой низкоскоростной информационный поток.

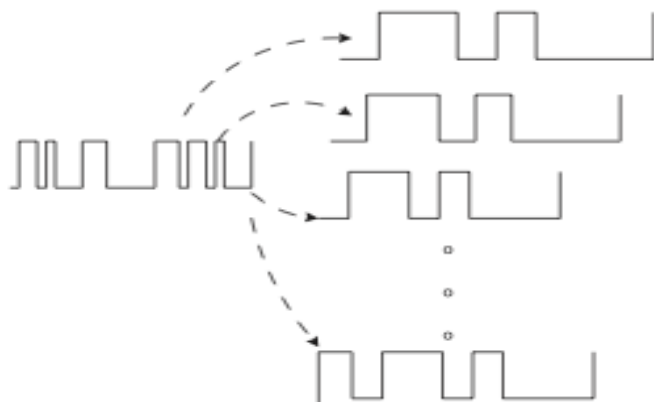


Рис. 13. Конвертирование высокоскоростного потока в OFDM в набор низкоскоростных параллельных потоков

Главное преимущество OFDM заключается в том, что OFDM делает сигнал гораздо более устойчивым к межсимвольной интерференции, возникающей в условиях многократных отражений сигнала. Продолжительность символа после OFDM становится значительно больше: при практикуемом количестве поднесущих 1024 длительность символа так же увеличится в 1024 раза. Эта величина становится значительно больше, чем возможная задержка прохождения сигнала (для дальности сетей городского масштаба).

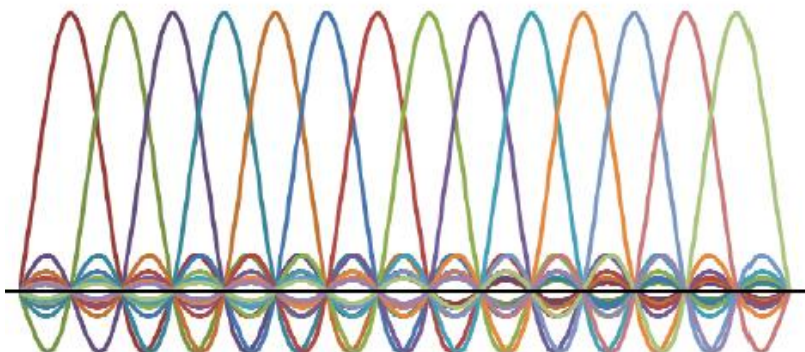


Рис. 14. Разбиение полосы радиоканала в OFDM на несколько несущих

Важным элементом технологии обработки широкополосного сигнала OFDM является использование защитного интервала. Это не несущий полезной информации временной интервал между передаваемыми символами. Длительность защитного интервала определяется возможными задержками распространения сигнала, вызванными различными траекториями (вследствие отражений) прохождения сигнала. Ввести защитный интервал стало возможным благодаря тому, что выходной символ OFDM имеет большую продолжительность. *Например, при скорости в 1 Мб/с и 1024 подканалов (и при защитном интервале, равном 1/8 продолжительности символа, т.е. 125 мкс) дальность связи равна 37 км.*

Технология OFDM применяется и для борьбы с частотно-зависимым затуханием, возникающим вследствие неравномерного (в частотном плане) поглощения энергии сигнала атмосферой и препятствиями, отражающими сигнал. В зависимости от степени ослабления поднесущей может быть использован более низкий или более высокий уровень модуляции.

Свойства в общем виде технологии OFDM:

- 1) преимущества:

- высокая эффективность использования радиочастотного спектра, т.к. при большом количестве поднесущих имеем прямоугольную форму огибающей спектра сигнала;
- простая аппаратная реализация: базовые операции ортогонального мультиплексирования реализуются методами цифровой обработки;
- хорошее противостояние межсимвольным помехам благодаря большой длительности символа и наличию защитного интервала;
- достижение максимально возможной скорости передачи для каждой поднесущей (адаптивно, в соответствии со степенью ее затухания) посредством применения различных схем модуляции.

2) недостатки:

- для работы оборудования требуется высокая степень синхронизации по частоте и времени;
- чувствительность к эффекту Доплера, что ограничивает применение OFDM в подвижных сетях доступа;
- неидеальность приемо-передающего оборудования приводит к наличию фазового шума, тем самым ограничивается производительность сети доступа;
- уменьшение спектральной эффективности из-за применения защитного интервала, необходимого для борьбы с межсимвольной интерференцией.

Несмотря на отмеченные недостатки, OFDM является отличным решением для современных сетей беспроводного доступа, работающих в условиях мегаполиса.

3.3. Разнесенный прием

Существенным искажением, вносимым радиоканалом является замирание, возникающее, в частности, из-за многолучевого распространения в условиях города. Для минимизации влияния замираний на качество доступа практикуют несколько технологий, одна из актуальных – разнесенный прием. Суть в

следующем: прием по разным каналам нескольких реплик переданного сигнала и их весовое суммирование. В этом случае вероятность того, что хотя бы один из каналов обеспечит необходимое качество сигнала при приеме повышается, поскольку определяется как произведение вероятностей.

Разнесение бывает:

- явное,
- неявное.

Явное разнесение базируется на избыточной передаче сигнала - передача одного и того же сигнала на нескольких ресурсных элементах канала (тайм-слотах, частотах, кодах и т.п.). На приемной стороне детектируются все реплики, а затем суммируются.

Неявное разнесение - сигнал передается только один раз, реплики сигнала возникают благодаря свойствам среды распространения (например, отражение, преломление). Посредством сложной обработки реплик сигналов возможно достичь необходимого качества канала доступа. Примером неявного разнесения является RAKE-приемник, впервые использованный в стандарте сотовой связи GSM. RAKE-приемник выделяет сигналы, пришедшие различными траекториями вследствие многолучевого распространения в условиях плотной городской застройки (т.е. имеющие различное время задержки), и суммирует их оптимальным способом.

В сетях абонентского доступа применяется несколько типов разнесенного приема:

- пространственное разнесение;
- частотное разнесение;
- временное разнесение;
- многолучевое разнесение;
- поляризационное разнесение.

Различают так же разнесение:

- при передаче (явное разнесение) и
- на приеме (явное и неявное разнесение).

Суммирование сигналов, пришедших различными каналами, осуществляют на векторной основе. Актуальны три способа:

- 1) максимальный сигнал: приемник анализирует значение сигнал/шум в каждом канале разнесенного приема и коммутирует на выход сигнал того канала, отношение сигнал-шум которого наибольшее;
- 2) оптимальное весовое суммирование: на выход сумматора подается реплика сигнала с максимальным отношением сигнал/шум, для чего различные реплики сигнала выравниваются по фазе и на основе оценки их амплитуды пропорционально усиливаются;
- 3) равновесное суммирование: после выравнивания фаз каждой реплики сигнала суммируются с одинаковыми весовыми коэффициентами, что делается для упрощения приемного оборудования.

Предварительное фазирование (выравнивание по фазе) позволяет реализовать когерентное сложение, тем самым достичь максимального значения сигнал/шум сигнала как при оптимальном весовом, так и при равновесном суммировании.

3.3.1. Пространственное разнесение

Пространственное (антенное) разнесение базируется на обработке сигналов, принимаемых не менее чем двумя пространственно разнесенными антеннами. При этом расстояние между антеннами приемника системы доступа должно быть не менее 10 длин волн принимаемых колебаний, что обусловлено необходимостью обеспечения некоррелированности замираний сигнала в различных ветвях разнесения. В этом случае вероятность того, что в одной из антенн сигнал будет значительно подавлен вследствие замирания, существенно снижается.

Повышение качества приема в данном случае достигается ценой усложнения приемного оборудования. Примером пространственного разнесения является стандарт беспровод-

ной телефонии DECT, где на базовых станциях применяется две пространственно разнесенные антенны.

3.3.2. Частотное разнесение

Частотное разнесение базируется на передаче одного и того же сигнала на нескольких разнесенных несущих. Причем разнесение несущих частот должно быть достаточно большим, чтобы замирания в каналах не коррелировали друг с другом. Качество приема при частотном разнесении так же достигается ценой усложнения приемного оборудования. Но более существенным недостатком, ограничивающим применение частотного разнесения, является потребление дополнительных спектральных ресурсов.

3.3.3. Временное разнесение

Временное разнесение базируется на передаче одного и того же сигнала в нескольких достаточно разнесенных тайм-слотах. Разнесение временных слотов должно быть достаточно большим, чтобы длительность отрезка перемещения превышала длительность замирания, а замирания в каждом временном интервале не были коррелированы друг с другом.

Актуально лишь для каналов с относительно быстрыми замираниями (т.е. длительность замирания небольшая). В каналах с медленными замираниями необходимо применять очень глубокое временное разнесение, что приведет к недопустимой задержке передачи информации и снижению общей производительности сети доступа.

Повторяемые символы соответствующим образом суммируются в приемнике.

3.3.4. Многолучевое разнесение

Технология многолучевого разнесения радикально меняет отношение к эффектам многолучевости, которые рассматривались как приводящие к искажению сигнала. Однако, любое препятствие направляет к приемнику часть энергии сигнала, которая при отсутствии препятствия была бы просто

потеряна. И если сформировать сигнал, реплики которого могут быть разделены при приеме, энергию, поступившую различными траекториями, можно использовать для улучшения характеристик системы доступа в сравнении со случаем, если бы многолучевость отсутствовала.

Многолучевое разнесение базируется на приеме символов, пришедших различными траекториями, сложившимися в каждый момент времени вследствие естественных преград. Многолучевое разнесение используется в широкополосных системах (в частности, кодовое разделение CDMA), причем вносимые различными траекториями задержки не должны превышать длительность чипа расширяющей последовательности, и сама последовательность - "белая". Приемником является согласованный фильтр, коррелятор, способный различать компоненты принимаемого сигнала, поступившие различными траекториями. Сигналы различных траекторий выделяются посредством корреляционной обработки с расширяющей чиповой последовательностью, затем базируются, далее следует оптимальное весовое суммирование.

3.3.5. Поляризацонное разнесение

Напомним, поляризация - это направленность вектора электрической составляющей электромагнитной волны в пространстве. Поляризация определяется антенной и бывает: вертикальная, горизонтальная и круговая (правая или левая, в зависимости от направления вращения вектора индукции). Поляризация радиоволны существенно меняется вследствие отражений от препятствий, что является причиной использования ее только в условиях прямой видимости. Некоторые свойства поляризации:

- помехи (природные и промышленные) в основном имеют вертикальную поляризацию,
- вертикально поляризованные волны отражаются от препятствий (включая земную поверхность) с

меньшим поглощением, чем горизонтально поляризованные,

- прохождение радиоволной ионосферы приводит к вращению плоскости поляризации.

Но самое главное - две радиоволны, линейно поляризованные под прямым углом друг к другу, не интерферируют.

Поляризационное разнесение является видом явного разнесения и, в силу свойств поляризации, применяется в каналах прямой видимости, причем, только в двух взаимно ортогональных поляризациях.

Для оборудования беспроводного (т.е. подвижного) доступа поляризационное разнесение не актуально. Однако между базовыми станциями сети доступа может применяться неявное поляризационное разнесение.

Поскольку пользователь может ориентировать терминал как угодно, т.е. излучаемый сигнал может иметь любой угол поляризации, то применяя в базовых станциях антенны с ортогональной поляризацией, можно существенно улучшить качество приема.

3.4. Канальное кодирование

Канальное кодирование позволяет восстановить потерянные вследствие прохождения по каналу связи информационные символы (к каналному кодированию так же относят шифрование, но это вопрос другого направления).

Достигается это за счет включения в состав передаваемого информационного потока довольно большого объема контрольной информации. Такое кодирование называют помехоустойчивым кодированием (кодированием с упреждающей коррекцией ошибок). В системах беспроводного доступа помехоустойчивое кодирование выполняется в виде процедур (рис. 15):

- блочное кодирование,
- сверточное кодирование,
- перемежение,

- скремблирование.

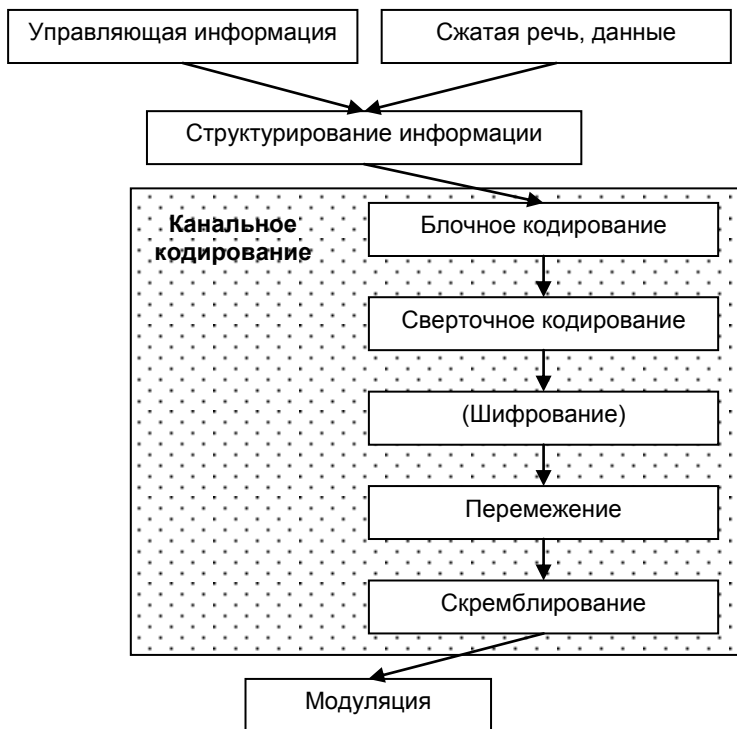


Рис. 15. Канальное кодирование

Канальный кодер выполняет ряд функций:

- добавляет управляющую информацию, также пропуская ее через помехоустойчивое кодирование;
- сжимает информацию во времени;

выполняет шифрование информации (при необходимости).

3.4.1. Блочное кодирование

При блочном кодировании входной символьный поток разбивается на блоки, каждый из которых преобразуются по определенному правилу кодером в блоки, большие по размеру. Отношение $R=k/n$, где n – размер входного блока, а k – выход-

ного, является мерой избыточности, вносимой кодером, и называется скоростью кодирования. Канальный кодер блочного типа с параметрами n , k обозначается (n, k) . Меньшая скорость кодирования, т.е. большая избыточность, обеспечивает большую помехоустойчивость канала.

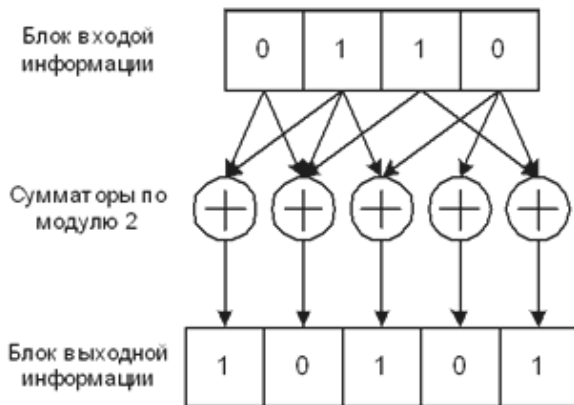


Рис. 16. Блочное кодирование

В сетях беспроводного доступа используются двоичные кодеры. Двоичные кодеры оперируют символами потока в двоичном представлении, т.е. состоят из одного бита каждый. Для примера, на рис. 16 представлен двоичный блочный кодера $(5, 4)$, построенный на пяти сумматорах по модулю 2. Каждый бит блока выходного потока является суммой по модулю 2 нескольких бит (от одного до k) входного блока. Второй справа сумматор является вырожденным - на его вход поступает лишь одно слагаемое.

Увеличение размера блока (n) приводит к повышению помехоустойчивости потока.

3.4.2. Сверточное кодирование

Сверточное кодирование обрабатывает символьный поток без разбиения на блоки, поток рассматривается как набор последовательных символов (количеством K).

При сверточном кодировании к каждому символу, содержащему несколько (k) бит, добавляются проверочные биты, в итоге на выходе символ становится n -битовым (рис. 17).

Биты выходного потока представляют собой сумму по модулю 2 нескольких бит (от двух до k) входных символов. Сверточный кодер в этом случае содержит n сумматоров по модулю 2. Сверточный кодер с параметрами n, k, K обозначается (n, k, K) . Как и в блочном кодере, отношение $R=k/n$ называется скоростью кодирования.

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0

а)

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0

б)

Рис. 17. Схема сверточного кодирования (4, 2, 5)
 $(n = 4, k = 2; R=k/n=1/2)$.

- а) контроль четности каждого байта позволяет обнаружить одиночные ошибки в байтах;
- б) добавление 8-го бита контроля позволяет исправить одиночную ошибку в восьми байтах

Параметр K определяет длину сдвигового регистра (в символах) и называется длиной ограничения. После формирования очередного выходного символа, входной поток смещается на символ вправо: первый символ выходит из регистра, символы со второго до k -го перемещаются вправо, а на первое место помещается следующий символ входного потока. В соответствии с новым содержанием регистра формируется следующий выходной символ потока.

По сути, в сверточном кодере осуществляется свертка импульсной характеристики кодера и входного информационного потока. Что и послужило названию сверточного кодера. Если символы входного потока однобитовые ($k=1$), то сверточный кодер называют двоичным.

3.4.3. Перемежение

Групповые ошибки возникают вследствие неизбежных глубоких замираний сигнала в условиях многолучевого пространства. Длительность замираний, как правило, охватывает несколько символов. Перемежение символов входного потока производится с целью преобразования групповых ошибок (пакетов ошибок) в одиночные ошибки. Механизмы канального кодирования (сверточное, блочное) не имеют возможности исправлять пакеты ошибок, но справляются с одиночными ошибками.

Суть перемежения заключается в изменении порядка следования символов входного потока по известной на передающей и приемной сторонах схеме. На приемной стороне восстанавливается порядок следования символов потока. В итоге воздействие замираний оказывается рассредоточенным среди потока символов.

В сетях беспроводного доступа используется несколько схем перемежения - диагональная, блочная, свёрточная и др.

3.4.4. Скремблирование

Скремблирование предназначено для повышения надежности синхронизации при приеме символьного потока. Скремблирование представляет собой такое преобразование потока символов, при котором достигается улучшение спектральных и статистических характеристик сигнала. Выходной информационный поток по различным характеристикам похож на случайные данные: частоты появления различных символов становятся равновероятны, спектр сигнала становится равномерным.

Основным элементом скремблера является генератор псевдослучайной последовательности, с которой и складывается по модулю 2 входной символьный поток. Скремблирование выполняется на последнем этапе канального кодирования.

3.4.5. Медленные скачки

Медленные скачки, т.е. медленные (по сравнению с длительностью символа) переключения рабочих частот сеанса передачи, предпринимаются для борьбы с воздействием помех, замираний сигнала. Механизм медленных скачков не относится к канальному кодированию, но существенно повышает эффективность последнего. Как правило, скачки осуществляются по окончании тайм-слота, принятого для соответствующего стандарта доступа (например, в стандарте GSM - 217 скачков в секунду).

Суть медленных скачков по частоте состоит в том, что сообщение (не бит, не символ) в каждом последующем тайм-слоте передается на новой несущей частоте. Параметры медленных скачков (начальная частота и частотно-временная матрица) назначаются для каждой подвижной станции в процессе установления канала доступа.

В системах широкополосного беспроводного доступа механизм несколько модифицирован, представлен в виде матрицы канального ресурса (частотно-временной матрицы).

3.5. Управление мощностью излучения

Управление мощностью передатчиков базовых и подвижных станций сети доступа необходимо для компенсации потерь в радиоканале (включая замирания) с одной стороны и для минимизации помех другим средствам связи с другой стороны.

3.5.1. Классический алгоритм. Эффект «дыхания» соты

Классический алгоритм управления излучаемой мощностью передатчиков определяет мощность мобильных станций (МС) такой, чтобы энергия сигнала от каждой в приемнике базовой станции была равна некоторому пороговому значению отношения сигнал/шум. В этом случае сигнал распознаваем, и сигнал не создает помех другим мобильным станциям.

Рассмотрим классический алгоритм на примере сотовой сети с CDMA, использующей один и тот же спектр для передачи потоков всех МС сети. Полагаем, что фоновый шум местности остается неизменным. Сигналы мобильных станций поступают в приемник базовой станции с различными случайными временными задержками, т.е. они некогерентны. А значит, сигналы других мобильных станций можно расценивать как помехи друг другу. Такие помехи называют внутрисистемными. Суммарный сигнал МС на входе базовой станции представляет собой широкополосный квазишумовой сигнал, спектр отражен на рис. 18а.

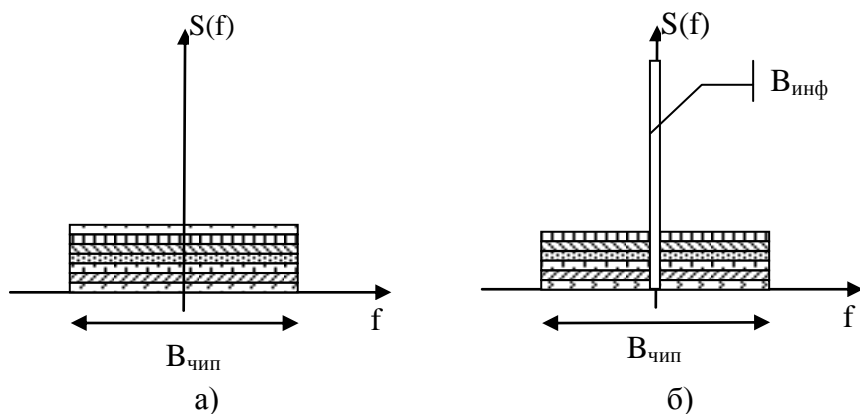


Рис. 18. Спектры сигнала на входе (а) и выходе (б) приемника базовой станции при нескольких активных абонентах

Задача приемника базовой станции выделить из суммарного сигнала и обработать сигнал отдельной МС. Полагаем, что все МС передают информацию с одной скоростью, а значит и мощности сигналов каждой МС на входе приемника базовой станции одинаковы. Соответственно спектр сигналов на рис. 18а состоит из суммы спектров сигналов одинаковой мощности. Когерентная обработка сигнала в приемнике базовой станции приводит к тому, что мощность принимаемого сигнала сосредотачивается в узкой полосе (рис. 18б). Для

CDMA ширина спектра сигнала обратно пропорциональна длительности бита информации, а если бит заменялся 64-мя чипами, то и спектр сузится в 64 раза, при этом, по закону сохранения энергии, энергия спектральных составляющих так же возрастет в 64 раза. Сигналы же остальных мобильных станций представляют помехи.

В случае если скорость передачи МС большая (передаем не речевой поток, а мультимедиа поток), изучаемая мощность мобильной станции также будет большая, чтобы обеспечить требуемое для распознавания информации соотношение сигнал/шум (см. рис. 19).

И в первом и во втором случаях помеховая ситуация в соте вследствие создаваемых помех другими МС значительно ухудшается. Таким образом:

- чем больше активных МС и,
- чем выше скорость передачи МС,

тем больше должна быть излучаемая мощность МС. Мощность МС ограничена конструктивно (параметром – максимально излучаемая мощность), следовательно, при достижении максимальной мощности дальность связи уменьшается.

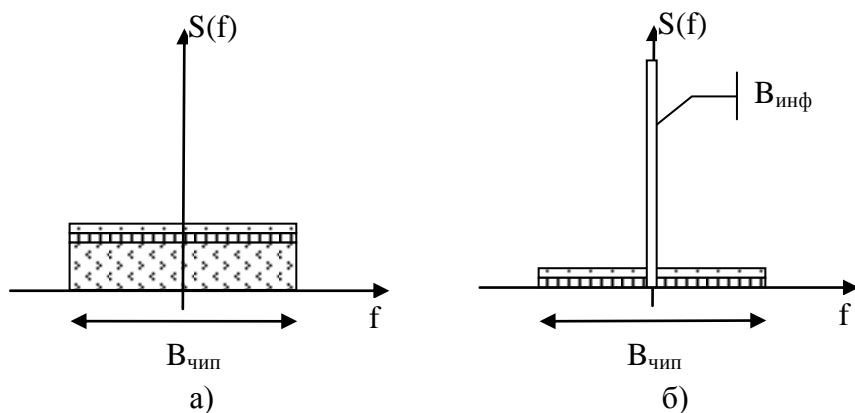


Рис. 19. Спектры сигнала на входе (а) и выходе (б) приемника базовой станции при увеличении скорости передачи информации

Изменения дальности связи, а значит, и размера соты в зависимости от количества активных абонентов в соте и от используемой ими скорости передачи информации происходят динамично, случайным образом, поскольку активность абонентов, их перемещение происходят случайным образом. Динамичные непредсказуемые изменения размера (топологии) соты получили название «дыхание» соты.

3.5.2. Модифицированный алгоритм управления мощностью

Модифицированный алгоритм базируется на учете положения МС внутри соты: удаленности МС от базовой станции. Чем ближе МС к базовой станции, тем большая энергия сигнала сможет достичь приемника базовой станции. Вблизи базовой станции МС может излучать сигнал с более высоким отношением сигнал/шум, а значит использовать более высокую скорость кодирования и кратностью модуляции. Такой модифицированный алгоритм управления мощностью излучения получил название - частичное управление мощностью.

Ограничение здесь является уровень сигнала, достигающий соседней базовой станции и представляющий фактически помеху. Для решения этой проблемы базовые станции сети постоянно измеряют уровень помех от соседних сот по каждому ресурсному блоку, формируют индикаторы перегрузки (значение шума превышает некоторый порог) и обмениваются ими. В соответствии со значением последнего устанавливается мощность излучаемого сигнала: если для ресурсного блока индикатор перегрузки превышает порог, то базовая станция передает мобильной станции команду снизить мощность сигнала, излучаемого в этом ресурсном блоке. Точность регулировки излучаемой мощности в каждом ресурсном блоке в зависимости от отношения сигнал/шум и составляет 1-2 дБ.

3.6. Прием/передача множеством антенн

Недостаточность частотного ресурса вынуждает разработчиков систем беспроводного доступа искать пути более

эффективного использования частот. В системах беспроводного доступа интерференция волн не позволяет принимать сигналы на одной частоте на одной и той же территории в одно и то же время. Одной из технологий, повышающей эффективность использования частотного ресурса является технология ММО (англ., Multiple-Input, Multiple-Output - множественный вход, множественный выход). Суть технологии заключается в использовании сформированных за счет естественных препятствий (застройки) различных маршрутов сигналов, формируемых несколькими передающими (удаленными друг от друга) и принимаемыми несколькими приемными (так же удаленными друг от друга) антеннами. Эту технологию так же называют пространственным мультиплексированием сигналов. ММО позволяет одновременно передавать различные сигналы на одной частоте на одной и той же территории (в одной и той же соте). Как видим, условием работы пространственного мультиплексирования является наличие плотной городской застройки, способствующей многократным отражениям сигналов от препятствий.



Рис. 20. Антенные системы технологии LTE

Технология MIMO использует для передачи потоков N-антенн и приема M-антенн, и те и другие должны быть разнесены между собой на расстояние, обеспечивающее слабую корреляцию между соседними антеннами (рис. 20).

Технология может быть использована для передачи потока для одного пользователя с удвоенной скоростью, либо с той же скоростью для двух пользователей, соответственно, различают: однопользовательский вариант и многопользовательский вариант (отражены на рис. 21).

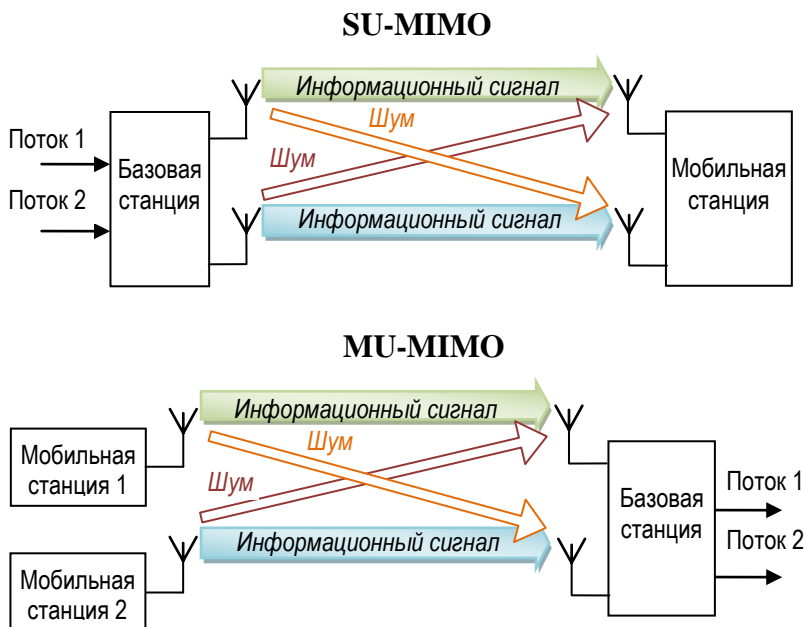


Рис. 21. Принцип MIMO (2x2)

Помимо целевого назначения технология MIMO обеспечивает:

- сглаживание теневых зон,
- повышает вероятность приема/передачи потоков по траекториям с замираниями, за счет использования нескольких путей распространения сигнала,

- увеличение пропускной способности сети доступа за счет формирования физически различных пространственно разделенных каналов.

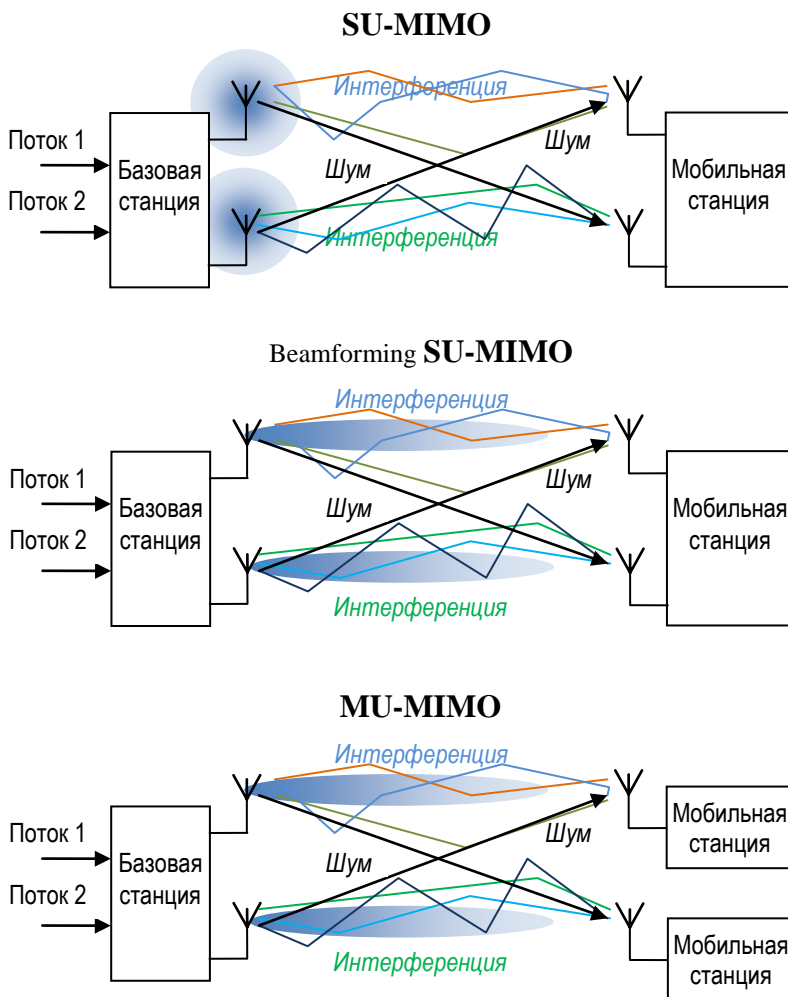


Рис. 22. Виды технологий ММО

Строго говоря, существует три вида технологии ММО, как показано на рис. 22:

- а) SU-MIMO - одиночный пользователь MIMO;
- б) Beamforming SU-MIMO - формирование луча в однопользовательском MIMO;
- в) MU-MIMO - многопользовательский MIMO.

Из перечисленных видов SU-MIMO рассматривается как основной метод. Он требует высокой производительности абонентского оборудования для компенсации внутрисистемных помех и комплексной обработки сигналов. Антенны на базовых станциях – круговые (или секторные).

Во втором типе, Beamforming SU-MIMO диаграмма антенны – лучевая. Направленный луч базовой станции позволяет уменьшить нагрузку на абонентское оборудование.

Многопользовательский MIMO (MU-MIMO), технология для соединения с несколькими терминалами, повышает общую производительность сети доступа. Антенны базовой станции – направленные, оборудование пользователей – простое (не требующее сложной обработки сигнала).

Технология MIMO позволяет повысить пропускную способность сети беспроводного доступа, не потребляя при этом дополнительного частотного ресурса и не увеличивая уровень модуляции и мощность сигнала. Увеличение пропускной способности достигается только за счет усложнения оборудования базовых станций и абонентского оборудования.

3.7. Частотно-селективная диспетчеризация

Базовая схема назначения частот для трехсекторных сот опирается на три частотных канала: в каждом из трех секторов используется своя частота (рис. 23, слева). Коэффициент переиспользования частот в этом случае равен 3.

Применение частотно-селективной диспетчеризации позволяет всем базовым станциям сети доступа работать на одной частоте, т.е. эффективность использования частотного ресурса возрастает, коэффициент переиспользования частот равен 1. Для достижения этого для каждого частотного ресурса (каждой мобильной станции) формируются индикаторы каче-

ства канала CQI, на основании которых и назначаются частоты для передачи.

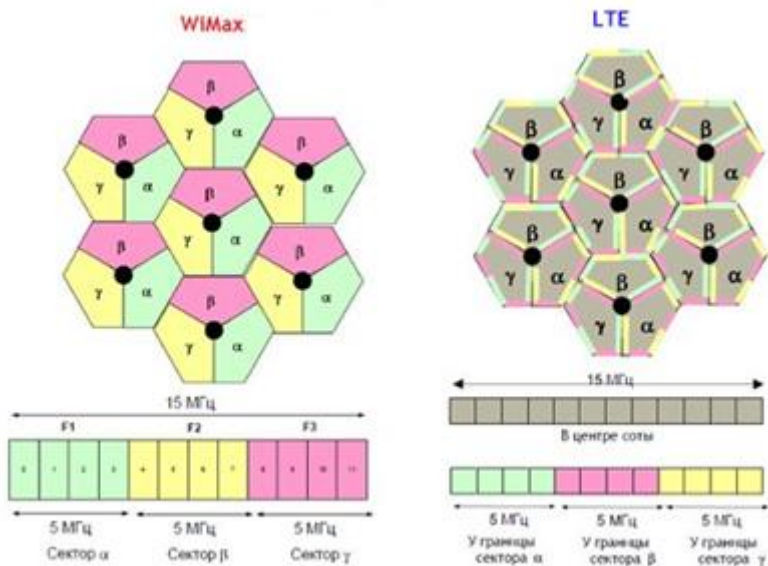


Рис. 23. Частотно-селективная диспетчеризация в сетях WiMAX и LTE

Идентификация положения мобильной станции - на краю соты или вблизи базовой станции - осуществляется по периодическим анализам мобильной станцией мощности сигналов от соседних базовых станций. На основе полученной информации для мобильных станций, расположенных вблизи базовой станции выделяться ресурсы из всей полосы канала (серая зона) (рис. 23, справа).

Мобильным станциям на краях сот выделяются частоты только из определенных поддиапазонов (розовый, голубой, желтый). Такой подход позволяет знать, в каком поддиапазоне частот концентрируются помехи вблизи границ каждой соты.

Возникающие внутрисистемные помехи в сети доступа минимизируются посредством:

- частотно-селективной диспетчеризации,

- координации помех между сотами,
- гибкому частотному плану.

Впервые частотно-селективная диспетчеризация использована в сети LTE.

3.8. Механизм диспетчеризации и повторные передачи

Целью диспетчеризации (т.е. распределения сетевых ресурсов между пользователями сети доступа) является баланс качества доступа и общей производительности системы. Механизм диспетчеризации предусматривает два вида: динамическая и статическая диспетчеризация.

Механизм динамической диспетчеризации предполагает выделение канальных ресурсов (тайм-слот, поднесущая) в соответствии с текущим состоянием канала связи, пролонгируя его на следующий тайм-слот. Благодаря динамической диспетчеризации становится возможным передача потоков на более высоких скоростях (за счет применения модуляции более высокого порядка, уменьшения избыточности канальной кодировки, передачи дополнительных потоков данных), для чего выделяются временные и частотные ресурсы с лучшими состояниями канала доступа.

Динамическая диспетчеризация сопровождается передачей служебной информации, объем которой может превысить объем полезной информации. Такая ситуация актуальна для потоков с небольшой полезной нагрузкой и через равные тайм-слоты, например, IP-TV. В таких случаях используется статическая диспетчеризация.

Традиционная технология повторной передачи Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) искаженного пакета, нашедшая применение в сетях сотовой связи третьего поколения, имеет некоторые особенности реализации: одновременно может поддерживаться несколько (до восьми) HARQ-процессов. Если пришедший пакет распознан успешно, приемник отправляет подтверждение приема. При отсутствии подтверждения производится повторная передача.

Повторные передачи требуют временных задержек передачи пакета данных. Однако, архитектурные изменения современных беспроводных сетей доступа значительно уменьшают задержки. Ситуация актуальна для приложений VoIP, бирж или онлайн-игр. В частности, пинг в сети LTE составляет не более 10 мс.

В сетях беспроводного доступа наибольшее искажение широкополосного сигнала при его распространении в атмосфере происходит из-за межсимвольной интерференции и частотно-зависимого затухания.

Базовыми методами увеличения пропускной способности широкополосного канала связи являются:

- кодовое разделение CDMA, базирующийся на размещении информационного бита чиповой последовательностью;
- квадратурная модуляция КАМ, базирующаяся на размещении информационного бита символом, несущим несколько бит полезной информации.

Помимо базовых, разработано множество технологических решений обработки сигналов, актуальных для сетей широкополосного беспроводного доступа:

- ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием OFDM;
- разнесение приема сигнала;
- пространственное мультиплексирование ММО;
- частотно-селективная диспетчеризация.

4. Моделирование распространения радиосигналов в условиях многократных отражений

Моделирование работы сетей беспроводного широкополосного доступа является начальным этапом проектирования сетей высокоскоростного доступа. Основная цель моделирования - обеспе-

чение радиопокрытия обслуживаемой территории без зон теней при предоставлении декларированного качества доступа.

4.1. Методы моделирования распространения радиоволн

Качество радиоканала доступа определяется параметрами оборудования: усилением передающей и принимающей антенн, мощностью передатчика, чувствительностью приемника и пр. Параметры формируются разработчиком системы доступа и могут быть оптимизированы. Однако, качество радиоканала существенно зависит от искажений при распространении в атмосфере (см. гл. 1), параметры которой (как и параметры препятствий на траектории распространения сигнала) изменить невозможно. Плотная городская застройка зданиями и сооружениями является причиной быстрых (рэлеевских) замираний радиосигнала. Медленные замирания радиосигнала вызваны неоднородность рельефа территории (наличие возвышенностей и впадин). Расчет уровня сигнала для каждой точки, обслуживаемой сетью доступа территории, требует знания и учета подробной информации о структуре данной территории. Даже тип покрытия здания (который может через некоторое время измениться) оказывает влияние на распространение сигнала. Не всегда возможно получить информацию, влияющую на распространение сигнала (в силу технических или юридических ограничений). Но и при наличии этой информации, требуется очень сложный анализ характера распространения радиоволн, чтобы получить картину распределения уровня сигнала на территории.

Затухание радиосигнала является в условиях городской застройки местности случайной величиной и зависит от совокупности факторов, влияющих на распространение радиоволн:

- отражение сигнала (происходит, если размер препятствия, превосходящие длину радиоволны;
- дифракция (т.е. преломление) радиоволн;
- рассеивание радиоволн (возникает, если на территории имеется большое число объектов размером

меньше длины радиоволны (например, листья деревьев);

- эффект Доплера (проявляется при перемещении абонента).

При моделировании распространения радиоволн в условиях плотной городской застройки различают два вида методов:

- статистические;
- детерминированные.

Статистические методы базируются на предварительных экспериментальных данных, от числа которых и зависит точность расчетов. Эти методы не принимают во внимание особенности конкретных радиотрасс. Позволяют определить лишь некоторые средние характеристики распространения сигналов.

Детерминированные методы базируются на конкретной информации о городской застройке: рельеф, высота зданий, тип стен зданий, тип крыш, растительность и пр., поэтому дают более точные результаты моделирования. Детерминированные методы позволяют получать прогноз и по другим параметрам, помимо уровня сигнала, например, задержку распространения радиосигнала.

Из двух озвученных видов моделей - статистический и динамический - актуальным являются только динамический, обеспечивающий достаточно высокую точность моделирования.

Одной из первых моделей распространения радиоволн, учитывающей ранее перечисленные факторы и методы, является модель Хата (Okumura-Nata). В основе модели Окамура-Хата лежат экспериментальные данные, полученные им в условиях города Токио. Помимо этого, имеется ряд моделей, также описывающих распространение радиоволн: Ли (W.C.Y.Lee), Ибрагим-Парсона, Walfish-Ikegami и др.

Однако не все из них можно применять в исходном виде для конкретной территории. Модель Walfish-Ikegami ограничивается в качестве описания местности распространения

только типом городской застройки и не учитывает реальный рельеф местности. Хорошая точность результатов моделирования имеет место при высоте антенны базовой станции выше уровня крыш, точность значительно снижается при высоте антенны, ниже уровня крыш. Модель Хата достаточно точно описывает распространение радиоволн для городов, структура и характеристики (плотность застройки, высотность и пр.) которых схожи с г. Токио. Перед применением той или иной модели необходима проверка и адаптация ее к реальным характеристикам в конкретном городе.

4.2. Модели распространения радиоволн

4.2.1. Модель свободного пространства

Модель свободного пространства основана на представлении расширяющегося сферического фронта волны при излучении радиоволны из точечного источника в пространстве. Модель описывает зависимость мощности электромагнитных волн, распространяющихся в свободном пространстве от расстояния. В линейной форме, затухание в свободном пространстве описывается формулой:

$$L_p = \frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (4)$$

где λ - длина волны сигнала, d - расстояние между антеннами передатчика и приёмника.

В логарифмической форме зависимость затухания от расстояния:

$$L_p = -32,4 - 20 \log(f) - 20 \log(d), \quad (5)$$

где f - частота сигнала в мегагерцах (МГц), d - расстояние в километрах (км), L_p - потери распространения в децибелах (дБ).

Как видим, при фиксированной частоте передачи f , первое и второе слагаемое (5) – постоянные величины, и затухание представляет собой логарифм расстояния.

Модель не учитывает затухания, связанные с составом атмосферы (запыленность, состав газов, влажность).

В системах беспроводного доступа модель не актуальна, поскольку имеют место и другие потери из-за препятствий, переотражений. В условиях города требуются более сложные модели. Эта модель используется для радиорелейных линий, связывающих базовые станции между собой, а так же в спутниковых системах связи.

4.2.2. Модель Ли

В условиях плотной городской застройки сигнал состоит из суммы сигналов, перемещающихся по прямой видимости, и многократно отраженных сигналов. Для используемых в сетях доступа частот даже после трех отражений сигнал имеет достаточный уровень для его распознавания. Потери при прохождении сигнала в атмосфере выше, чем в свободном пространстве.

Упрощенная формула в модели Ли для частот, используемых в сетях доступа и сотовой связи (экспериментальные данные получены для частоты 900 МГц):

$$L_p = 1.14 \cdot 10^{-13} \frac{h^2}{d^{3.84}}, \quad (6)$$

где h - высота (в метрах) антенны базовой станции, d - расстояние (в километрах) между передатчиком и приемником.

В логарифмическом виде модель Ли:

$$L_p = -129,5 - 38,4 \log(d) - 20 \log(h). \quad (7)$$

Модель учитывает высоты антенн абонентской и базовой станции, удаленность, и не учитывает наличие зданий и сооружений.

4.2.3. Модель Хата

Модель Хата основана на значительных эмпирических измерениях распространения радиосигнала в городских условиях. Модель учитывает такие параметры как частота, высоты антенн передатчика и приемника, плотность застройки.

В логарифмическом виде модель:

$$L_p = -K_1 - K_2 \log(f) + 13,82 \log(hb) + a(hm) - [44,9 - 6,55 \log(hb)] \log(d) - K_0, \quad (8)$$

где f - несущая частота, МГц; h_b - высота антенны передатчика, м; h_m - высота антенны приемника, м; d - расстояние между базовой станцией и абонентской станцией, км.

Модель действительна только для определенных ограничений, прежде всего:

- h_b - от 30 до 200 м,
- h_m - от 1 до 10 м,
- d - от 1 до 20 км.

Коэффициентами $a(h_m)$ и K_0 описываются распространение радиоволн в «городе» или «городе с плотной застройкой»:

- $a(h_m)=[1,1\log(f)-0,7]h_m-[1,56\log(f)-0,8]$ - для города;
- $a(h_m)=3,2[\log(11,75h_m)]^2-4,97$ - для города с плотной застройкой;
- $K_0=0$ - для города;
- $K_0=3$ dB - для города с плотной застройкой.

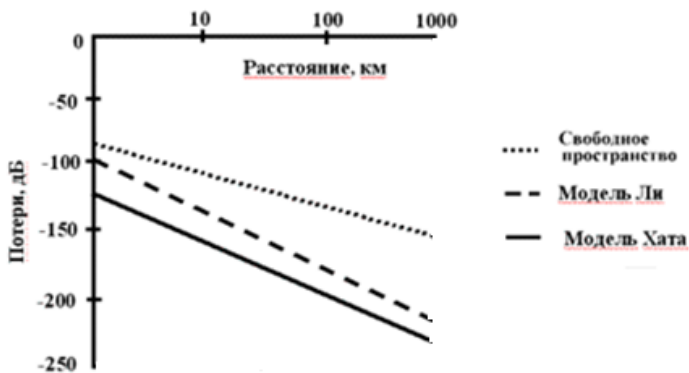


Рис. 24. Зависимость потерь на траектории распространения сигнала от расстояния для моделей распространения: свободное пространство, Ли, Хата

Для учета частотного диапазона используются коэффициенты K_1 и K_2 :

- $K_1=69,55$ для частотного диапазона от 150 до 1000 МГц;
- $K_1=46,3$ для частотного диапазона от 1500 до 2000 МГц;

- $K_2=26,16$ для частотного диапазона от 150 до 1000 МГц;
- $K_2=33,9$ для частотного диапазона от 1500 до 2000 МГц.

Чем больше параметров учитывает модель, тем больше потерь на траектории распространения сигнала она выявляет и, с другой стороны, тем сложнее модель. Сравнение результатов расчетов потерь для различных моделей представлено на рис. 24: свободное пространство, Ли и Хата. Расчеты проведены для частоты 881,5 МГц при высоте антенны передатчика 30 м и высоте антенны приемника 1,5 м, тип застройки - городская застройка.

Зависимость потерь в канале от типов местности для различных моделей представлена на рис. 25.

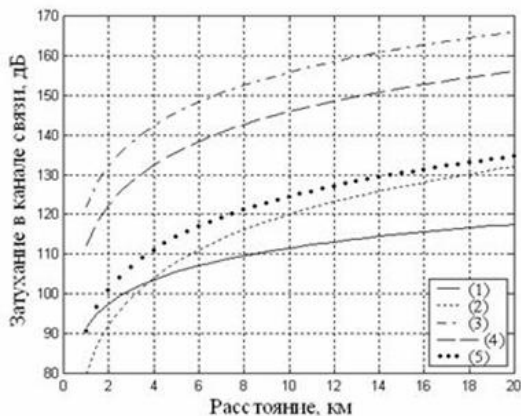


Рис. 25. Зависимость затухания в канале доступа от расстояния для разных типов местности: (1) - свободное пространство, (2) - двухлучевая модель, (3), (4), (5) - модель Хата (соответственно городская зона, пригородная зона, сельская местность)

4.3. Программные средства проектирования сетей беспроводного доступа

Как уже говорилось, проектирование сетей беспроводного доступа трудоемкий процесс, требующий учета множест-

ва параметров местности: рельефа, застройки, растительность и пр. Для автоматизированного проектирования сетей сотовой связи и сетей беспроводного доступа разработано несколько программных средств. К российским разработкам относятся: Универсальная система RPS-2 и Программный комплекс ONEPLAN RPLS.

Универсальная система RPS-2 позволяет выполнять автоматизированное проектирование беспроводных сетей различной архитектуры (радиорелейных, сотовых, региональных), работающих в различных стандартах, в том числе и широкополосных сетей беспроводного доступа. Возможности универсальной системы:

- задание стандарта доступа, его параметров;
- размещение базовых станций в заданном месте подлежащей обслуживанию территории;
- задание оптимального состава оборудования для базовых станций (из имеющейся и дополняемой оператором базы данных оборудования);
- задание распределения плотности трафика в подлежащей обслуживанию территории для анализа устойчивости работы сети доступа;
- расчет, отображение на экране и документирование основных характеристик проектируемой сети доступа:
 - уровень сигнала (покрытие) в обслуживаемой базовой станцией территории,
 - необходимую для обеспечения доступа мощность абонентского оборудования,
 - соотношение сигнал/шум в прямом и обратном каналах с учётом всех внутрисистемных и внешних помех,
 - зоны обслуживания базовыми станциями, требуемое количество частотных каналов для обслуживания абонентов с заданным качеством,
 - зоны переключения абонентов с одной базовой станции (или сектора) на другую и т.д.;

- расчет показателей электромагнитной совместимости (уровня взаимных помех) планируемой сети доступа с другими радиоэлектронными системами;
- оптимизация параметров планируемой сети доступа посредством перемещения базовых станций на местности, изменения состава и технических параметров их оборудования;
- отображение результатов экспериментальных (полевых) измерений уровня сигнала с возможностью сравнения их с результатами расчёта, что позволяет провести оптимизацию параметров математической модели распространения сигнала.

Расчет радиопокрытия выполняется по одной из моделей распространения радиоволн, рекомендованной к использованию МККР:

- статистические модели распространения радиоволн Хата и Уолфиш-Икегами, в которых характер местности учитывается грубо (сельская, пригород, городская и плотная городская застройка),
- модель распространения МККР - рекомендация 370-5, в которой используются статистические данные профиля радиотрассы.

Универсальная система RPS-2 при наличии хорошей цифровой карты местности может выполнять расчеты уровня радиосигнала (и других характеристик сети) на основе модели, учитывающей:

- профиль радиолинии с выделением препятствий,
- дифракционных потерь на препятствиях,
- дополнительных потерь в листве деревьев,
- эффекты дифракции на крышах и экранировки в городской местности.

Отраженные выше функциональные возможности имеет и названный ранее программный комплекс ONEPLAN RPLS.

Любая модель распространения сигнала (в том числе, используемая программными средствами) формируется на ос-

нове эмпирических данных и требует корректировки под реальные особенности распространения радиоволн на конкретной местности. Отметим, что достоверность и точность моделирования распространения радиосигнала в значительной степени зависят от подробного описания среды распространения сигнала.

5. Актуальные стандарты беспроводного доступа

Основными требованиями к современным сетям беспроводного доступа являются:

- на сигнальном уровне - эффективное использование спектрального ресурса радиоканала при любых значениях скорости доступа - помехоустойчивость;
- на уровне протоколов - обеспечение требуемого уровня качества обслуживания каждого абонента сети доступа.

5.1. Сети WPAN - семейство стандартов IEEE 802.15

Семейство стандартов IEEE 802.15 описывает требования к построению беспроводной персональной сети - WPAN (Wireless Personal Area Network). В семейство стандартов входят:

- Bluetooth - IEEE 802.15.1,
- IEEE 802.15.3,
- ZigBee - IEEE 802.15.4,
- UWB (Ultra Wideband) - IEEE 802.15.4a/b.

Стандарт IEEE 802.15 представляет собой универсальный радиointерфейс, обеспечивающий связь на малых расстояниях нескольких электронных устройств, например, временное соединение между плеером и беспроводными наушниками, между несколькими смартфонами, клавиатурой и ноутбуком. Стандарт рассчитан на недорогие, малопотребляющие устройства.

Рассмотрим WPAN на примере IEEE 802.15.1 Bluetooth (версия 1.2).

Стандартом предусмотрено использование нелицензи-

руемого частотного диапазона 2,4-2,483 ГГц. В доступной полосе частот в 83 МГц выделено 79 каналов шириной 1 МГц, по 2 МГц – защитный интервал по краям диапазона. Полная скорость Bluetooth в радиоканале шириной 1 МГц составляет 1 Мбит/с. Дуплексные каналы организованы двумя типами:

- ассиметричный канал: «вниз» - 723,3 Кбит/с, «вверх» - 57,6 Кбит/с,
- симметричный канал 433,9 Кбит/с.

Стандартом предусмотрена обязательная регулировка излучаемой передатчиками мощности в диапазоне от 20 до 4 дБм. Чувствительность приемника довольно низкая - 70 дБм (для сравнения, чувствительность телефонов GSM - 103 дБм).

Сети Bluetooth в соответствии с их размером и емкостью называют пикосети. Пикосети Bluetooth базируются на иерархическом принципе. В каждой сети есть (рис. 26):

- ведущее устройство – мастер,
- одно или несколько ведомых (slave).

Функции мастера:

- управление обменом информацией в пикосети,
- установление временной синхронизации,
- регулировка мощности передатчиков ведомых устройств.

Емкость пикосети Bluetooth: один мастер и до 7 активных ведомых. Технология соединений в сети Bluetooth достаточно «демократична»: мастером становится устройство, инициирующее обмен информацией.

Информационный поток в Bluetooth разбивается на пакеты, размещаемые во временных интервалах длительностью 625 мкс.

Нелицензируемый (т.е. не требующий наличия лицензии на используемое излучающее оборудование) диапазон 2,4 ГГц сильно «заселен»: сети Wi-Fi, медицинское оборудование, СВЧ-печи, пульты и др. Для защиты каналов связи от помех в Bluetooth применены скачки по частоте (по псевдослучайному закону). В соответствии с синхросигналами мастера каждый

новый пакет передается на иной частоте. Всего за секунду происходит 1600 переключений частоты.

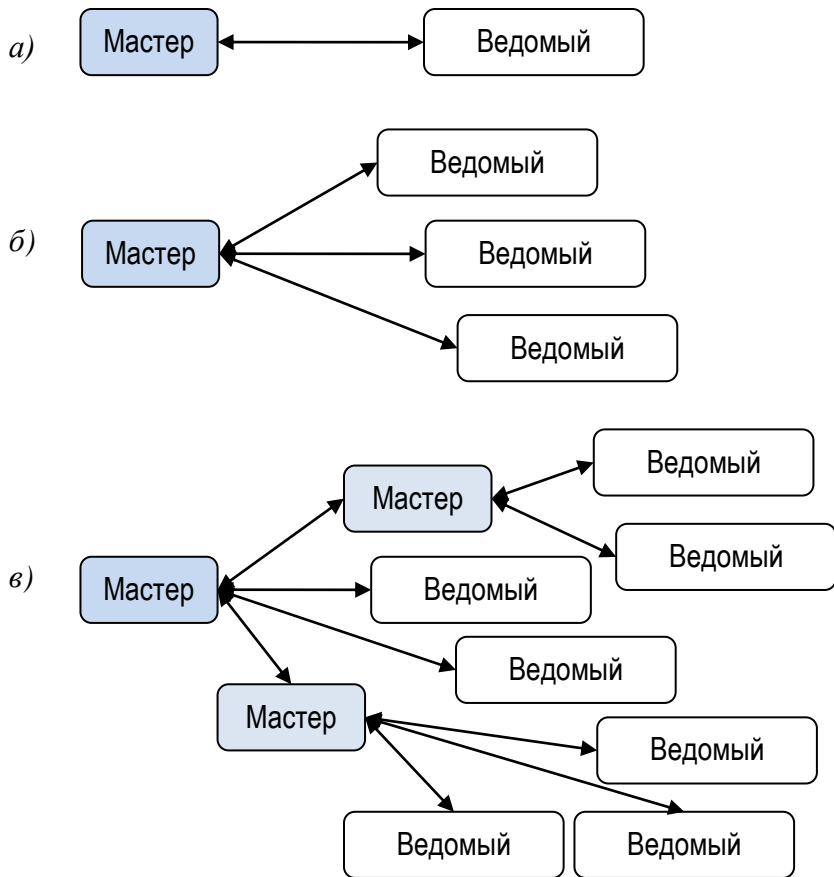


Рис. 26. Пикосети с соединениями: а) точка-точка, б) точка-многоточие, в) распределенная сеть

Мастер определяет процесс обмена пакетами: пакеты мастера размещаются в четных тайм-слотах, ведомого - в нечетных.

Для передачи по радиоканалу в Bluetooth применена Гауссовская ЧММС.

Отметим, что технологии доступа WPAN развиваются. Стандарт IEEE 802.15.4-2003 обеспечивает очень длительное время автономной работы (месяцы и даже годы) и низкую сложность устройств, хотя и имеет низкую скорость передачи информации. IEEE 802.15.6 разработан для сетей датчиков, обеспечивающих мониторинг показателей тела человека. Пропускная способность технологии Li-Fi (использование оптического спектра в качестве несущих частот), согласно вышедшему в 2012 году стандарту IEEE 802.15.7 для VLC-технологий (англ. Visible Light Communication, связь по видимому свету), определена в пределах 96 Мбит/с.

5.2. Сети WLAN - семейство стандартов IEEE802.11 Wi-Fi

Семейство стандартов высокоскоростного беспроводного доступа к локальным компьютерным сетям WLAN (Wireless Local Area Network - беспроводная локальная сеть) IEEE802.11 охватывает несколько уровней модели взаимодействия открытых систем (модель OSI) и включает следующие спецификации:

- к физическому уровню относятся 802.11a, 802.11b и 802.11g;
- к вышележащему MAC-уровню - 802.11d, 802.11e, 802.11i, 802.11j, 802.11h и 802.11r ,
- к более высоким уровням 802.11f и 802.11с.

На рис. 27 изображена эволюция технологий беспроводных локальных сетей доступа, и показан переход от скоростей 1 Мб/с на гигабитную скорость за 18-летний период (от 1997 до 2015) в рамках стандарта IEEE 802.11ac.

Рассмотрим более подробно актуальный стандарт беспроводного доступа IEEE 802.11n, утвержденный в 2009 году.

В России разрешено использование стандарта в трех диапазонах частот 2400-2483.5, 5150-5350 и 5650-5725 МГц.

Основным достоинством стандарта 802.11n является значительное увеличение скорости доступа в сравнении с существовавшими спецификациями: теоретически 802.11n способен обеспечить скорость доступа до 600 Мб/с, т.е. практиче-

ски в 11 раз более высокую, чем у стандарта 802.11g (максимальная скорость которого равна 54 Мб/с). Указанная скорость достигается при работе с абонентскими устройствами, поддерживающими работу с 4-мя антеннами. При работе по одной антенне скорость составляет до 150 Мб/с.

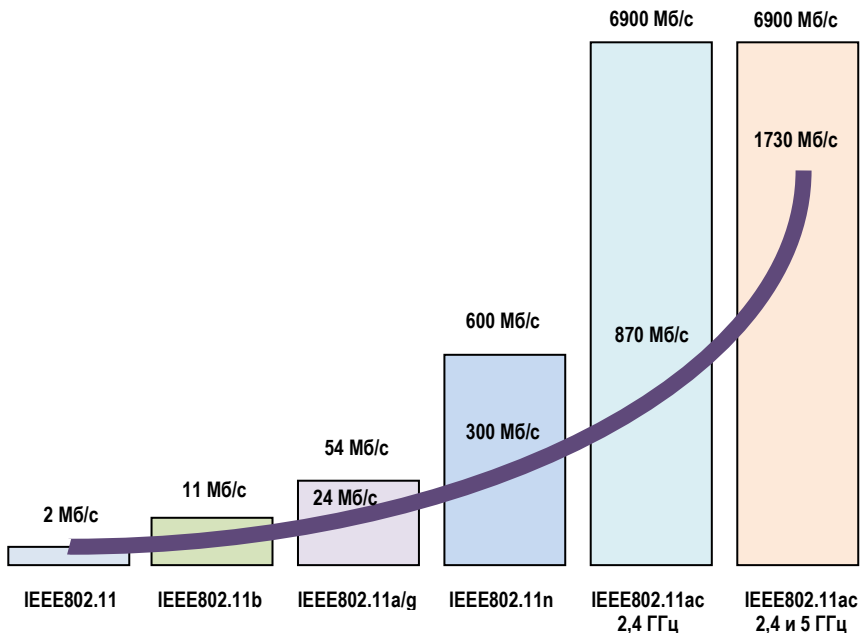


Рис. 27. Эволюция точек доступа Cisco с 802.11 физического уровня (максимальная и типичная скорости доступа)

В отличие от рассмотренных ранее стандартов WPAN в IEEE 802.11n реализован механизм адаптации скорости передачи к состоянию канала связи – чем более зашумлен канал, тем ниже скорость передачи. Реальная скорость доступа значительно меньше указываемых в описании стандарта теоретических значений: в два и более раз. Следующие факторы существенно ограничивают реальную пропускную способность:

- наличие помех (работающие в этом частотном диапазоне точки доступа, другие радиоэлектронные устройства),
- пропускная способность канала доступа всегда делится между клиентами,
- максимальная скорость доступа беспроводного маршрутизатора всегда определяется возможностями самого «плохого» клиента, у которого более зашумлен/ослаблен сигнал, более старый стандарт (a/b/g) и т.д.

Стандарт IEEE 802.11n поддерживает работу по трем непересекающимся каналам на частоте 2,4 ГГц: 1-й, 6-й и 11-й. Таким образом, при работе нескольких точек доступа на пересекающихся каналах скорость доступа у обоих будет снижена.

Возможность работы устройств стандарта 802.11n в одном из двух диапазонов 2,4 или 5 ГГц намного повышает их пропускную способность, позволяя отстраиваться от помех.

Полоса стандартного канала в спецификации 802.11n равна 20 МГц. В стандарте заложена возможность агрегации двух каналов для достижения широкой полосы - 40 МГц.

Ключевым новшеством стандарта IEEE 802.11n является применение пространственного мультиплексирования - MIMO (Multiple Input, Multiple Output - много входов, много выходов). Пространственное мультиплексирование MIMO базируется на одновременной передаче нескольких информационных потоков по одному радиоканалу, но различными траекториями. Различные маршруты прохождения сигнала возникают вследствие многократных отражений от препятствий (стен, пр.) и разноса передающих (и приемных) антенн.

Стандартными антенными конфигурациями для доступа являются 3×3 или 2×3. Недорогие модели абонентских устройств имеют одну передающую и две принимающие антенны, поскольку по статистике абоненты больше принимают, чем передают. Более сложное абонентское оборудование имеет конфигурацию антенн 4×4, и обеспечивает более высокую скорость доступа.

Используемые кабельные Ethernet-каналы для подклю-

чения к оборудованию провайдера могут стать узким местом на маршруте сетевого трафика. Кабельное подключение точек доступа к сети провайдера по технологии Ethernet может оказаться не достаточным с точки зрения пропускной способности (100 Мб/с против 600 Мб/с у радиоканала подключения абонентских устройств). Альтернативой является переход кабельного соединения с провайдеров на Gigabit Ethernet.

Спецификация 802.11n поддерживает совместимость с абонентским оборудованием более ранних стандартов 802.11b, 802.11g в диапазоне 2,4 ГГц и 802.11a - в диапазоне 5 ГГц.

Зоны доступа беспроводных сетей стандарта 802.11n обычно рассматриваются как имеющие сферическую форму (при отсутствии препятствий). Однако применение технологии ММО (предполагающей передачу на одной частоте нескольких сигналов разными, разнесенными антеннами) вследствие возникающей интерференции приводит к искажению формы зоны покрытия и делает ее менее предсказуемой. Вследствие чего инструментарий для моделирования (проектирования) сетей доступа может оказаться непригодным или малоэффективным.

5.3. Сети WMAN - стандарт сотовой связи UMTS (WCDMA)

Сети доступа городского масштаба WMAN представлены тремя стандартами - два из которых являются эволюцией сетей сотовой телефонной связи (3G UMTS и 4G LTE) и один - эволюцией корпоративных кабельных компьютерных сетей до уровня беспроводных каналов связи масштаба города - IEEE 802.16 Wi-Max. Рассмотрим их в порядке увеличения пропускной способности.

Стандарт сотовой связи 3-го поколения UMTS (англ. Universal Mobile Telecommunications System - Универсальная мобильная телекоммуникационная система) представляет собой надстройку над сетями сотовой связи GSM с целью получения более высокой скорости передачи информации. Напомним, стандарт GSM разрабатывался для телефонии и в принципе не способен

обеспечить сколь-нибудь существенную скорость доступа в силу узости полосы радиоканала. Сети 3G фактически строятся в одной из технологий: EDGE, WCDMA, HSDPA, HSPA+ и др. Рассмотрим подробнее один из них - UMTS (работающих по технологии WCDMA). UMTS развертывают на базе действующих сетей GSM. Структура интегрированной сети приведена на рис. 28.

Для организации дуплекса сети UMTS используют две взаимоувязанные технологии радиодоступа с частотным и временным разделением, соответственно UTRA-FDD и UTRA-TDD. Дуплексный разнос составляет 190 МГц.

На основе существующей в GSM подсистемы коммутации, включающей действующие сети базовых станций GSM, контроллеры и коммутаторы каналов, развернуты новые сети радиодоступа UTRAN (англ., UMTS Terrestrial Radio Access Network - Наземная сеть радиодоступа в составе UMTS), включающие узлы базовых станций, контроллеры и коммутаторы пакетов, образующие ядро сети UMTS. Узлы базовых станций состоят из одной (в несекторизованных сотах) или трех (в секторизованных сотах) базовых станций. Для сопряжения интерфейсов телефонии (сеть GSM) и передачи данных (сеть UTRAN) предназначен межсетевой транскодер, выполняющий преобразование скоростей сигналов телефонии и сигналов данных.

UMTS использует кодовое разделение CDMA для организации доступа к канальным ресурсам. Полоса радиоканала - 5 МГц, чиповая скорость - 3,84 Мчип/с. Различным скоростям передачи информации соответствуют различные значения коэффициента расширения спектра SF, соответственно, емкости чиповой последовательности.

Характеристики основных пользовательских каналов в направлении «вверх» и «вниз» приведены (при канальном кодировании с избыточностью $R = 1/2$) в табл. 2 и табл. 3.

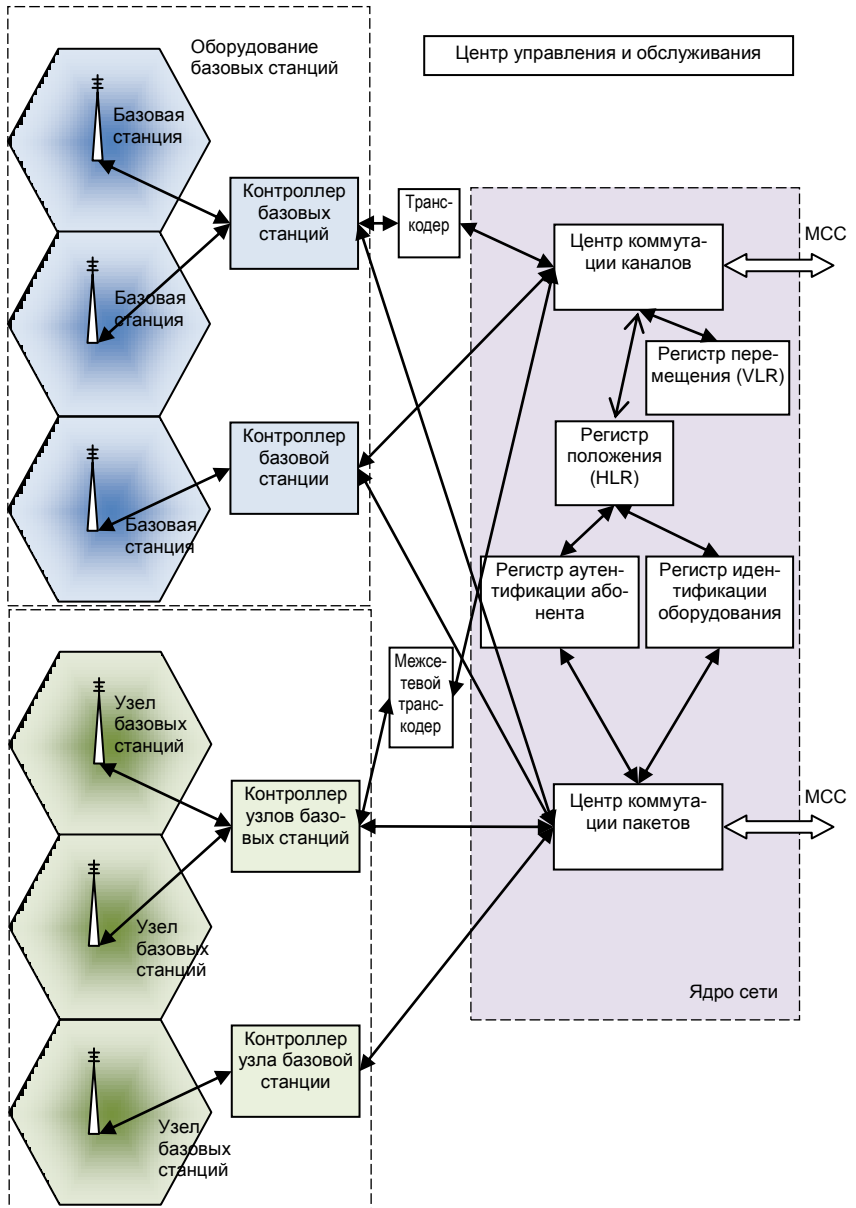


Рис. 28. Архитектура интегральной сети UMTS-GSM

В табл. 2 (направление вверх) во втором столбце указана скорость передачи бит в радиоканале, а в третьем - скорость передачи информации при канальном кодировании со скоростью $R_{\text{кода}} = 1/2$. Табл. 3 имеет более сложную структуру, т.к. при частотном дуплексе информационные биты мультиплексируют с битами управления, что снижает скорость передачи полезной информации. Но, с другой стороны, в канале «вниз» применена квадратурная модуляция, т.е. каждый передаваемый символ несет два бита информации, что повышает скорость в канале «вниз». В итоге, максимально возможная (т.е. поддерживаемая стандартом) скорость передачи информации при $R_{\text{кода}}=1/2$ в канале «вниз» и «вверх» одинаковы и равны 2,3 Мб/с.

Таблица 2

Характеристика канала «вверх»

Коэффициент расширения спектра SF	Скорость в радиоканале, кб/с	Скорость передачи данных, кб/с
256	15	7,5
128	30	15
64	60	30
32	120	60
16	240	120
8	480	240
4	960	480
4 (при 6 каналах параллельно)	5740	2300

Таблица 3

Характеристика канала «вниз»

Коэффициент расширения спектра SF	Скорость в радиоканале, кб/с	Скорость передачи данных, кб/с
512	15	1-3
256	30	6-12
128	60	20-24

Продолжение табл. 3

Коэффициент расширения спектра SF	Скорость в радиоканале, кб/с	Скорость передачи данных, кб/с
64	120	45
32	240	105
16	480	215
8	960	456
4	1920	936
4 (при 3 каналах параллельно)	5760	2300

Анализ табл. 2 и 3 показывает, что максимальная скорость передачи при SF=4 составляет 480 кб/с в направлении «вверх» и 936 кб/с в направлении «вниз». Значение SF=4 выбирается при условии «чистого» канала, с понижением соотношения сигнал/шум коэффициент расширения спектра (и, соответственно, длина чиповой последовательности) увеличивается, что, в свою очередь, приводит к снижению скорости передачи. При наличии свободных каналов в соте, возможно вести передачу с более высокими скоростями. Для этого абоненту выделяется несколько (до 6-ти) параллельных каналов при SF=4, при этом скорости передачи «вверх» и «вниз» не обязательно равны.

В качестве чиповых последовательностей для разделения каналов при частотном дуплексе применен ортогональный код с переменным коэффициентом расширения SF. В параллельных ветвях чиповые коды взаимно ортогональны, что обеспечивает организацию каналов связи «вниз» с разными скоростями (коэффициентами расширения SF). Одна базовая станция поддерживает на одном частотном канале 4 канала CDMA с SF = 8, 32 канала с SF = 128 и до 64 каналов с SF = 256.

Кроме каналообразующих кодов в UMTS (при частотном дуплексе) применяют скремблирующие коды: в канале «вниз» в абонентских станциях и в базовых станциях используют коды Голда, представляющие собой сумму двух m-последовательностей, сдвинутых относительно друг друга.

Информационный поток структурирован по времени. Передача ведется кадрами, длительность базового кадра составляет 10 мс, кадры могут быть объединены при незначительной загруженности сети доступа - 20, 40 или 80 мс. Кадр включает 15 временных интервалов (рис. 29), длительностью $2/3$ мс. Суперкадр включает 72 кадра по 10 мс. Длительность суперкадра (720 мс) равна 6 мультикадрам GSM (120 мс каждый). Тем самым обеспечивается общая временная синхронизация в сетях GSM/UMTS.

Для минимизации внутрисистемных помех, как и во всех сетях доступа, в каждом временном окне (т.е. каждые $2/3$ мс) базовой станцией и абонентским оборудованием передаются команды управления мощностями передатчиков.

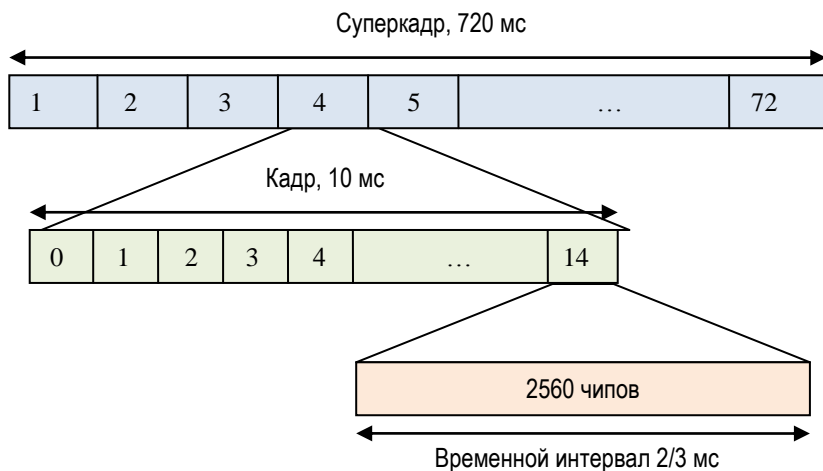


Рис. 29. Временные характеристики UMTS

Внутренние (между контроллерами базовых станций и узлами базовых станций) и внешние (между контроллерами базовых станций, центром коммутации и узлом обслуживания абонентов GPRS) интерфейсы UTRAN построены на основе технологии АТМ (англ., Asynchronous Transfer Mode - Асинхронный режим передачи). Технология АТМ характеризуется

низким уровнем задержки передачи (пинг), а для каждого потока создается сквозной канал с характеристиками качества (допустимое количество ошибок, минимальная скорость, задержки и т. д.) в соответствии с классом трафика, т.е. поддерживается механизм качества сервиса (QoS).

На текущий момент сети UMTS, используя механизм WCDMA, обеспечивают теоретическую скорость передачи информации в канале «вниз» до 21 Мб/с (при использовании актуальной технологии HSPA+) и до 5,76 Мб/с в канале «вверх».

5.4. Сети WMAN - семейство стандартов IEEE 802.16 WiMAX

5.4.1. Эволюция стандартов IEEE 802.16

Стандарты беспроводного доступа городского масштаба WMAN IEEE 802.16 разрабатывались как альтернатива кабельным сетям доступа типа выделенной линии, xDSL. Беспроводные сети имели преимущество в относительно быстром развертывании сетей доступа на достаточно больших территориях без проведения работ по прокладке кабеля, что особенно актуально для мест с неразвитой сетевой инфраструктурой и в случаях стихийных бедствий.

Первая версия стандарта IEEE 802.16 была принята в 2001 году и изначально предусматривала использование диапазона 10-66 ГГц. Стандартом представлена организация широкополосной беспроводной связи с топологией «точка-многоточие». IEEE 802.16-2001 ориентирован на стационарные беспроводные сети, причем в силу использования частотного диапазона 10-66 ГГц (которому свойственно сильное затухание в атмосфере) доступ был возможен, только в зоне прямой видимости между передатчиком и приемником. Для передачи сигнала использовалась одна несущая. Такое построение сети доступа - прямая видимость (работа без отражений), одна несущая - позволял избежать одной из главных проблем радиодоступа - интерференции сигналов вследствие многолучевого распространения. Выбранный частотный диа-

пазон позволял применять достаточно большую ширину каналов - типичное значение 25 (или 28) МГц, что позволяло достичь высокой скорости доступа – до 120 Мб/с. Однако сети с фиксированным доступом не получили существенного распространения.

Следующая спецификация стандарта - IEEE 802.16a-2003 так же ориентирована на построение стационарных сетей масштаба города. Однако предусматривала использование частотного диапазона от 2 до 11 ГГц, который не требует прямой видимости между приемником и передатчиком. Зона покрытия в таком случае значительно расширяется.

Продолжением стандарта IEEE 802.16a является стандарт IEEE 802.16d, ориентированный на построение стационарных сетей доступа внутри помещений.

Стандарт IEEE 802.16e описывает построение роуминга между сетями стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16.

Европейской альтернативой стандарту IEEE 802.16 является стандарт HiperMAN, разработанный ETSI. Основой HiperMAN является стандарт IEEE 802.16-2004. В европейский стандарт внесены некоторые отличия на канальном (MAC) и сетевом уровнях, основное внимание HiperMAN уделено типам приложений и качеству услуг.

Продвижением семейства стандартов IEEE 802.16 занимается форум WiMAX, являющийся некоммерческой организацией. Форум WiMAX создан по инициативе корпорации Intel с участием ведущих производителей телекоммуникационного оборудования (Aperto Networks, Fujitsu Microelectronics America, OFDM Forum, Wi-LAN, Inc. и др.). Целью форума WiMAX является сертификация устройств беспроводного широкополосного доступа стандартов IEEE 802.16/ETSI HiperMAN (рис. 30). Участниками форума являются поставщики телекоммуникационных услуг, производители оборудования (в том числе тестового оборудования), сертификационные лаборатории и разработчики программных средств.

5.4.2. Общая характеристика сетей WiMAX

Архитектура сетей WiMAX схожа с построением сетей сотовой связи: базовые станции, контроллеры, центр коммутации пакетов (см. рис. 28).

Базовая станция использует, как правило, ненаправленные антенные системы. Дальность работы базовой станции в случае прямой видимости может достигать 30 км, типовой радиус соты 6-8 км. Организация дуплекса - частотное разделение и временное разделение.

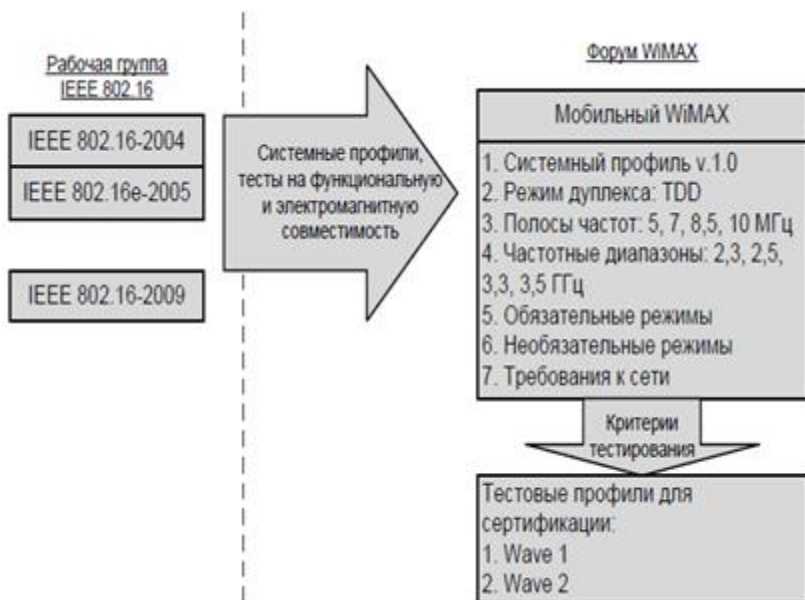


Рис. 30. Стандарты доступа IEEE 802.16 и форум WiMAX

Основные параметры стандартов семейства IEEE 802.16 представлены в табл. 4. В России для стандартов IEEE 802.16 выделены диапазоны частот в соответствии с табл. 5.

Базовые станции располагаются в зоне прямой видимости и используют диапазон частот от 10 до 66 ГГц для обмена информацией между собой. Базовый (опорный) сегмент объе-

диняет связь базовых станций друг с другом, и основывается на IP-протоколе (стандарте IEEE 802.3-2005 Ethernet).

Таблица 4

Основные параметры стандартов IEEE 802.16

Стандарт	IEEE 802.16	IEEE 802.16a/d	IEEE 802.16e
Частотный диапазон, ГГц	10-66	2-11	2-6
Тип сети	стационарная		подвижная
Зона покрытия	прямая видимость	вне прямой видимости	
Радиус зоны покрытия, км	2-4	4-6 (макс. до 20)	4-6
Скорость передачи данных, МБ/с	32-134 (полоса 28 МГц)	до 75 (полоса 20 МГц)	до 15 (полоса 5 МГц)
Модуляция	квадратурная, 16КАМ, 64КАМ	OFDM256, двоичная фазовая, квадратурная, 16КАМ, 64КАМ	
Ширина канала, МГц	20, 25 и 28	изменяемая от 1,25 до 20	

Таблица 5

Основные режимы для стандарта IEEE 802.16 в РФ

Диапазон частот, ГГц	Разрешенные полосы частот, МГц	Общая ширина выделенных полос, МГц	Тип беспроводного доступа
2,5	2500-2530 2560-2570 2620-2630 2660-2670 2680-2690	70	мобильный
3,5	3400-3450 3500-3550	100	фиксированный
5	5150-5350 5650-5725 5725-6425	975	фиксированный

Сети WiMAX легко масштабируемы, строятся на основе стандартных модулей, объединяемых посредством стандартных интерфейсов, поддерживают взаимодействие с дру-

гими беспроводными или проводными сетями доступа. В WiMAX реализован механизм обеспечения качества обслуживания QoS.

5.5. Сети WMAN - стандарт сотовой связи LTE

LTE представляет собой перспективную технологию построения сетей беспроводного доступа. Формально, LTE относится к поколению, следующему за 3G (т.е. 4G, 5G и т.д.). Все внутрисистемные интерфейсы основаны на IP-технологии, LTE полностью IP-сеть.

Стандарт LTE разработан и утвержден международным партнерским объединением 3GPP (не имеет стандартов институтов IEEE и ETSI).

LTE отличается от многих стандартов беспроводного доступа ключевыми параметрами:

- максимальные скорости доступа: 326 Мб/с на приём и 172 Мб/с на передачу,
- пинг - около 10 мс.

LTE базируется на трех базовых технологиях:

- многостанционный доступ на базе ортогонального частотного мультиплексирования OFDM,
- пространственное мультиплексирование каналов посредством многоантенных систем MIMO и
- эволюционная системная архитектура сети.

Дуплекс реализован посредством частотного и временного разделения каналов.

SAE (System Architecture Evolution, Эволюция системной архитектуры) - архитектура ядра сети, характеризуется:

- полностью пакетная сеть, целиком построена на IP-технологии,
- малая задержка радиодоступа - до 10 мс,
- поддержка мобильности между гетерогенными сетями радиодоступами (UMTS, WiMAX).

Основное внимание технологий системы сосредоточено на эффективности использования полосы канала. Базовым элементом системной архитектуры SAE является усовершенствованное пакетное ядро (Evolved Packet Core, EPC).

Архитектура ядра сети SAE имеет особенности в распределении интеллекта. Структура сетей доступа 3G включает несколько уровней иерархии: базовые станции, контроллеры радиосети, центр коммутации. Основную нагрузку по управлению радиоресурсом базовых станций выполнял контроллер, к которому они и подключены по принципу "звезда". Ядро сети (включающее центр коммутации) являлось центром «звезды», к нему подключены контроллеры. Для обеспечения требуемой функциональности SAE уровень управления сдвинуто от центра к периферии. Контроллеры базовых станций вошли в состав базовых станций, т.е. уровень контроллеров удален, а управление радиочастотным ресурсом выполняют сами базовые станции. В LTE усовершенствованные базовые станции называются eNB (Evolved Node B). Базовые станции подключаются непосредственно к шлюзу ядра посредством интерфейса S1. Такое объединение позволило снизить задержки в системе.

Еще одной особенностью архитектура ядра является возможность новых eNB соединяться с соседними eNB, для чего используется интерфейс X2. Значительное количество вызовов абонентов предназначается для мобильных устройств в той же или соседних сотах. Такое построение позволяет направлять многие вызовы напрямую из соты в соту, т.е. по более короткому маршруту и с минимальным использованием ядра сети. Усовершенствованные станции eNB являются более сложными, чем базовые станции 3G.

Следующим этапом развития стандарта LTE является LTE-Advanced (LTE-A). LTE-A позволяет увеличить производительность сети доступа. В LTE-A реализовано множество технологий, хотя и не являющихся новыми, но не применяв-

шихся комплексно в единой системе доступа. Принципиальными новшествами в LTE- Advanced является:

- агрегация частот,
- улучшенное использование многоантенных технологий,
- релейный режим включения базовых станций.

5.6. Сети WRAN - когнитивное радио IEEE 802.22

5.6.1. Когнитивность сетей стандарта IEEE 802.22

Сети WRAN предназначены для обслуживания территорий с низкой плотностью населения (сельская местность, незаселенная местность). Применение технологий сетей WMAN для таких территорий экономически не целесообразно в виду малой дальности распространения радиоволн используемого диапазона частот - УВЧ и СВЧ (ультра- и сверхвысокие частоты) характеризуются значительным ослаблением с расстоянием и крайне слабым огибанием волной препятствий. Типовая дальность для диапазона 2-6 ГГц составляет 6 км, для покрытия территории (слабозаселенной) радиусом 30 км потребуются 2-3 десятка базовых станций, причем, использовать они будут не эффективно. Такое построение сети доступа (неважно на базе какого стандарта) не является рентабельным.

Решением проблемы является использование в сети доступа частотного диапазона с благоприятными свойствами распространения на большой территории (радиусом до 70 км): огибание возвышенностей местности, слабое затухание в атмосфере и пр. Такими свойствами обладают частоты в несколько сот МГц, т.е. 100-800 МГц. Однако во многих государствах (в том числе России) этот диапазон (а именно, от 54 до 862 МГц) лицензионно отведен под наземное телевидение.

Новый стандарт доступа IEEE 802.22, работающий в диапазоне частот от 54 до 862 МГц, основан на применении когнитивных радиотехнологий для обеспечения электромаг-

нитной совместимости сети высокоскоростного доступа и наземного телевидения в одном географическом районе.

Когнитивная радиосистема – это самоорганизующаяся радиосистема с динамическим доступом к радиочастотному спектру, способная на основе познания эксплуатационной и географической среды (накопления в процессе функционирования знаний), адаптировать свои функциональные и технические параметры к условиям изменяющейся среды.

В зависимости от используемого способа доступа к радиочастотному спектру, нацеленного на исключение радиопомех лицензированным средствам радиосвязи различают методы:

- системы с когнитивным пилот-сигналом (излучаемым лицензированными средствами радиосвязи),
- системы на основе контроля занятости каналов (выявляемой посредством сканирования),
- системы с геолокационной базой данных лицензированных средств радиосвязи (обновляемой на основе договора с телеведущей компанией),
- комбинация указанных выше методов.

Методы обеспечивают выбор частот для работы систем когнитивной радиосвязи таким образом, чтобы обеспечить и их работу, и гарантированное отсутствие помех другим (лицензированным) системам радиосвязи.

В стандарте IEEE 802.22 для анализа занятости полос частот в диапазоне 54÷862 МГц используется комбинация двух методов: геолокационная база данных и сканирование частотного спектра.

Геолокационная база данных содержит актуальные сведения:

- о расположении когнитивных устройств,
- о расположении лицензированных средств радиосвязи,
- перечень занятых каналов лицензированными средствами радиосвязи.

Для исключения помех лицензированным средствам радиосвязи расположение базовых и лицензированных пере-

датчиков и станций когнитивной системы должно быть известно с точностью до 15 м, а абонентского оборудования - 100 м. Определение координат осуществляется посредством систем спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС).

Сканирование частотного спектра для анализа занятости каналов лицензированными средствами радиосвязи проводится при включении нового оборудования в сеть доступа и периодически в процессе работы когнитивной системы. Сканирование осуществляется базовой станцией сети доступа и абонентским оборудованием. Такая технология обеспечивает актуальность информации об использовании радиоканалов.

Таким образом, когнитивность стандарта IEEE 802.22 заключается в управлении спектром и мощностью излучения на основе обновляющихся данных о занятости каналов, сведений о местоположении и активности лицензированного оборудования, сведений о расположении когнитивного оборудования. На практике это означает, что если используемый радиоканал (в стандарте используются радиоканалы, шириной равной половине телевизионного канала и позиционированные как и в сетке каналов телевидения) выявлен в процессе сканирования как используемый лицензированными средствами радиосвязи, система когнитивного радио должна перестроиться на другой, не занятый канал. В этом случае согласно когнитивной технологии могут быть предприняты следующие действия:

- уменьшение излучаемой мощности абонентского оборудования,
- уменьшение излучаемой мощности базовой станции,
- если снижение мощности не обеспечивает требуемого снижения уровня помех - перейти на другой частотный канал.

5.6.2. Общая характеристика сетей IEEE 802.22

Сети доступа IEEE 802.22 обеспечивают покрытие больших зон в сельской местности - до 100 км, типовой размер зоны составляет от 17 до 30 км.

Одна базовая станция обеспечивает доступ до 255 пользователей.

Как уже упоминалось, ширина канала доступа для совместимости с наземным телевидением в различных странах может быть выбрана 6, 7 или 8 МГц (в России - 8 МГц).

Мощность передатчика базовой станции - до 100 Вт, абонентского оборудования – до 4 Вт. Приемные антенны абонентов - направленные.

Минимальная скорость доступа: канал к абоненту составляет 1,5 Мб/с, от абонента - до 384 кб/с. Типовая скорость доступа 23, 27 или 31 Мб/с, в зависимости от используемой ширины радиоканала. Может использоваться в движении до 114 км/ч.

Стандартом предусмотрен временной дуплекс.

В стандарте IEEE 802.22 использован метод OFDMA с единственным режимом 2048 поднесущих, что обеспечивает надежность передачи вне прямой видимости. Для оптимального выбора между эффективностью использования спектра и влиянием задержек распространения сигнала используются 4 длины циклического префикса: 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 от длительности символа.

Для адаптации к состоянию радиоканала (достижения компромисса между скоростью и надежностью передачи) определены 12 комбинаций из трех модуляций (QPSK, 16KAM, 64KAM) и трех скоростей кодирования (1/2, 2/3, 5/6), (см. табл. 6).

Таблица 6

Режимы модуляции в сети IEEE 802.22

№	Модуляция	Скорость кодирования	Скорость доступа (при полосе 6 МГц), Мб/с
1	QPSK	1/2	4,56
2	QPSK	2/3	6,05
3	QPSK	1/2	6,81
4	QPSK	5/6	7,56
5	16KAM	1/2	9,08
6	16KAM	2/3	12,10

Продолжение табл. 6

№	Модуляция	Скорость кодирования	Скорость доступа (при полосе 6 МГц), МБ/с
7	16КАМ	1/2	13,61
8	16КАМ	5/6	15,13
9	64КАМ	1/2	13,61
10	64КАМ	2/3	18,15
11	64КАМ	1/2	20,42
12	64КАМ	5/6	22,69

Оборудование сети доступа IEEE 802.22 используют два типа антенн: направленные антенны для передачи данных и круговые для сканирования. Для передачи информации на базовых станциях сети доступа применяются либо секторные, либо антенны в круговой диаграммой направленности, а на абонентском оборудовании - направленные антенны с коэффициентом усиления до 14 дБ.

Использование диапазона частот СВЧ (т.е. сотни МГц) накладывает ограничение на мобильность абонентов: в соответствии с диапазоном, размер направленной антенны составляет порядка 60 см. Соответственно, целевой аудиторией стандарта IEEE 802.22 являются: промышленность, органы управления, академические организации, провайдеры. Частному абоненту для достижения мобильности потребуется (как вариант) подключение к сети IEEE 802.22 через точку доступа Wi-Fi.

Существенным ограничением пропускной способности сетей стандарта IEEE 802.22 является невозможность поддержки пространственного мультиплексирования (MIMO). Поскольку в диапазоне частот 54-862 МГц физически сложно осуществить разнесение нескольких антенн на необходимое расстояние в десять длин волн (т.е. порядка 10 м на средней частоте).

Стандарт IEEE 802.22 не является единственной технологией, работающей в дециметровом диапазоне. Сети LTE способны обеспечивать доступ в диапазонах частот от 700

МГц до 3,7 ГГц. Имеются практические применения LTE: в диапазоне 700 МГц в США развернута сеть высокоскоростного доступа, насчитывающая более 12 млн. пользователей. В Германии в диапазоне 800 МГц сеть LTE насчитывающая более 4500 базовых станций. В десятках стран Европы, Америки и Азии развернуты сети высокоскоростного доступа в диапазонах 700 и 800 МГц.

Таким образом, видится малоперспективной конкуренция стандарта IEEE 802.22. с существующими сетями 4G. Перспективность использования стандарта возможна в диапазоне метровых волн (ниже 300 МГц), где зона покрытия может достигать 70 км.

5.7. Сети WWAN - спутниковый доступ

Спутниковый доступ актуален, когда наземная телекоммуникационная инфраструктура отсутствует либо слабо развита.

Различают два способа спутникового доступа:

- асимметричный (он же - односторонний), когда при имеющемся низкоскоростном наземном канале доступа, возможно получать информацию с высокой скоростью через спутник,
- симметричный (он же - двухсторонний), наземные каналы не требуются, а для приёма и передачи информации используются спутниковые каналы.

Односторонний спутниковый доступ предполагает наличие у абонента медленного и/или дорогого способа подключения к интернету (EDGE, HDSL и т. п.). В этом случае запросы по этому каналу передаются на узел провайдера, а ответные потоки передают абоненту через высокоскоростной спутниковый канал. Поскольку соотношение исходящий/входящий трафик - примерно от 1/10 при веб-серфинге, а при загрузке файлов - 1/100, то затраты на дорогой наземный канал нивелируются. Если же имеется недорогой (и быстрый) наземный ка-

нал, то спутниковый канал имеет смысл как резервный вариант подключения к интернету.

Двухсторонний спутниковый доступ предполагает приём и передачу информации через спутниковый канал доступа. Спутниковый доступ позволяет обмениваться информацией на больших скоростях, но является достаточно дорогим (по стоимости оборудования и трафика).

Для спутникового доступа применяется геостационарная группировка, тем самым упрощается оборудование абонента - нет необходимости управлять направлением антенны, отслеживая положение спутника. Напомним, высота геостационарной орбиты составляет 35 786 км.

Спутниковый доступ имеет ряд особенностей (или, правильнее, недостатков).

Особенностью спутникового доступа является достаточно большая задержка (пинг), обусловленная временем прохождения электромагнитной волны расстояния от абонента до орбиты спутника и обратно. Например, для геостационарного спутника сигнал идёт 119 мс (со скоростью света 300000 км/с), а учитывая квитирование (подтверждение получения) минимальная величина задержки интерактивного ответа для двустороннего спутникового доступа составит порядка 476 мс. Это ограничивает возможности использования приложений реального времени - телеконференций, игр, бирж.

Ещё одной особенностью является несовместимость оборудования различных производителей. Переход от одного оператора спутникового доступа к другому возможен только со сменой оборудования доступа. Попытка стандартизации оборудования спутникового доступа различных производителей (стандарт DVB-RCS) была поддержана очень небольшим количеством компаний.

Третьим свойством является неизбежная периодическая интерференция сигнала при пересечении спутником линии наземная абонентская станция-Солнце.

При использовании спутниковой группировки, имеющей негеостационарную орбиту, существенно удорожается оборудование абонента из-за необходимости слежения за спутниками.

Что касается используемых диапазонов частот, актуальными (но для различных применений) являются С, Ku и Ka диапазоны.

С-диапазон (3,4-7 ГГц) требует для приема/передачи антенны сравнительно большого размера и достаточно мощные передатчики. Этот диапазон используется в основном под магистральные каналы и корпоративные сети.

Ku-диапазон (10,7-18,0 ГГц) имеет следующие преимущества:

- широкая зона покрытия, достаточно одной станции для обслуживания больших территорий,
- небольшие размеры антенны (например, 0,8-1,0 м для спутников Ямал-300К, Экспресс АМ5, Ямал-402),
- недорогие и компактные передатчики мощностью до 2 Вт.

В Ka-диапазоне (18-31 ГГц) сейчас используются частоты для линии "вниз" 18,3-18,8 ГГц (В-band) и 19,7-20,2 ГГц (А-band). В силу своей специфики Ka-диапазон удобен для передачи информации. Помимо того, что он мало задействован, благодаря высокой частоте волн возможно формирование более узких лучей по сравнению с Ku-диапазоном - с диаметром зоны порядка 1000 км. Построены спутники с так называемыми "зонавыми лучами" - Ka-Sat, Viasat-1, Jupiter (Echostar-17), где лучи расположены по принципу сот с повторным использованием одних и тех же частот в нескольких лучах. Такой подход позволяет радикально повысить эффективность использования спектра и, соответственно, пропускную способность спутниковой сети.

В настоящее время возможен доступ в Ka-диапазоне со спутника Ka-Sat, покрытие которого присутствует на части европейской территории России (рис. 31). Скорость доступа (при

антенне 0,75 метра) составляет до 6 Мб/с на передачу и 18 Мб/с на прием, технически возможны и более высокие скорости.

Разделение канального ресурса спутникового ретранслятора несколькими пользователями осуществляется (как и в системах наземного доступа) посредством следующих методов множественного доступа:

- с частотным разделением FDMA,
- TDMA,
- с кодовым разделением CDMA.

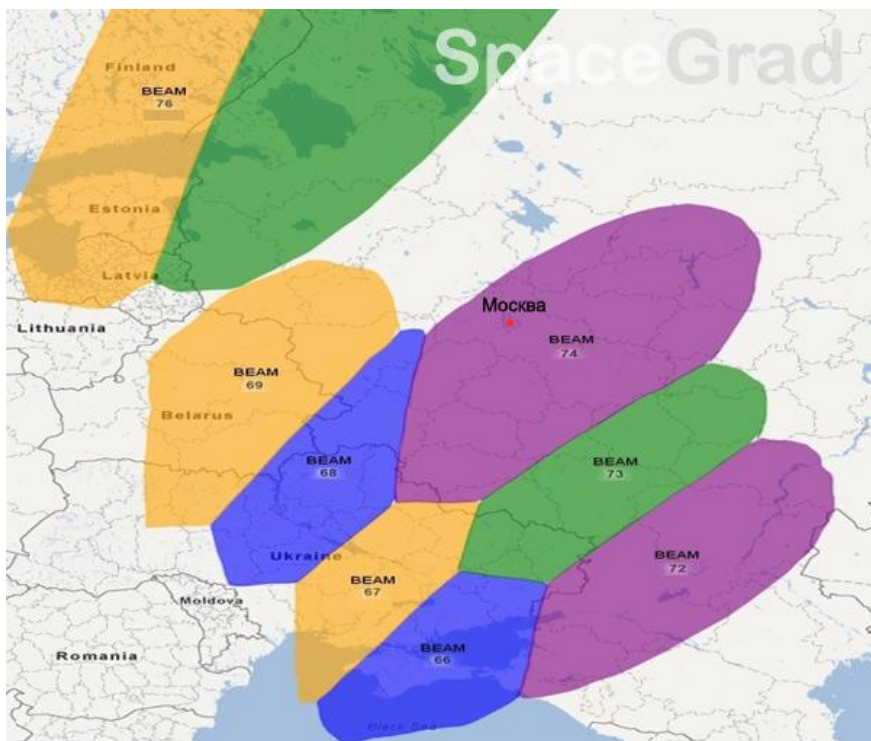


Рис. 31. Карта покрытия Ka-Sat России
[URL:<http://spacegrad.ru/VSAT/Ka-Sat/map>]

Кроме того, поскольку многим пользователям не требуется постоянный доступ к спутниковой связи, им канал связи

(таймслот) выделяется по требованию с помощью технологии DAMA (Demand Assigned Multiple Access - множественный доступ с предоставлением каналов по требованию).

Для обработки сигналов в каналах вниз применяются модуляции QPSK, 8PSK со сверточным кодированием или с кодированием Рида-Соломона. Обратный канал связи базируется на многочастотном временном разделении MF-TDMA с QPSK модуляцией с турбо кодированием.

6. Технологии стандарта беспроводного доступа LTE

Как уже говорилось, LTE - технология построения сетей «после третьего поколения», базирующаяся целиком на базе IP-технологий и имеющая высокие скорости доступа и малый пинг. Дополним сведения о LTE: в табл. 7 отражены диапазоны частот, используемые в России.

Таблица 7

Диапазоны частот LTE в России

Оператор	Частотный диапазон (UL/DL), МГц	Ширина канала, МГц	Тип дуплекса	Номер в 3GPP
Yota (Мегафон)	2500-2530 2620-2650	30	FDD	Band 7
Мегафон	2530-2540 2650-2660	10	FDD	Band 7
Мегафон	2575-2595	20	TDD	Band 38
МТС	2540-2550 2660-2670	10	FDD	Band 7
МТС	2595-2615	20	TDD	Band 38
Билайн	2550-2560 2670-2680	10	FDD	Band 7
Ростелеком/Теле2	2560-2570 2680-2690	10	FDD	Band 7
Ростелеком/Теле2	832-839.5 791-798.5	7.5	FDD	Band 20

Продолжение табл. 7

Оператор	Частотный диапазон (UL/DL), МГц	Ширина канала, МГц	Тип дуплекса	Номер в 3GPP
МТС	839.5-847 798.5-806	7.5	FDD	Band 20
Мегафон	847-854.5 806-813.5	7.5	FDD	Band 20
Билайн	854.5-862 813.5-821	7.5	FDD	Band 20
МТС	2595-2620	25	TDD	Band 38
Теле2	453-457.4 463-467.4	4.4	FDD	Band 31

В LTE использовано множество прогрессивных технологий, рассмотренных в разделе 3. Однако их реализация имеет некоторые особенности.

6.1. Базовые технологии LTE

6.1.1. Эволюция системной архитектуры

Одной из базовых технологий стандарт LTE является эволюционная системная архитектура сети - SAE. Эта архитектура ядра сети включает несколько типов шлюзов (узлов):

- узел управления мобильностью - базовый модуль сети LTE. Его функциями являются: подвижность абонентов, эстафетная передача, слежение за абонентским устройством, активации сетевых ресурсов, аутентификация абонента, шифрование, узаконенный перехват, мобильность (гетерогенность).
- обслуживающий шлюз. Функции: маршрутизация пакетов, хэндовер, мобильность (гетерогенность) предоставление копии пользовательской информации при узаконенном перехвате.
- пакетный шлюз. Основное назначение - соединение с внешними пакетными сетями, причем одновременно через точки подключения. Функции: защита

пакетов, фильтрация пакетов, биллинг, узаконенный перехват, мобильность (гетерогенность).

- узел выставления счетов абонентам. Это общее название для устройств, отслеживающих предоставляемые услуги и обеспечивающих тарификацию.

Особенностью системной архитектуры является так называемая плоская модель, позволяющая минимизировать задержку реакции сети. Достичь этого удалось ценой значительного усложнения базовых станций eNB: фактически, теперь каждая базовая станция имеет в составе свой контроллер. Базовые станции управляют рядом функций: управление доступом, балансировка нагрузки, управление мобильностью, включая эстафетную передачу.

6.1.2. Многостанционный доступ

Особенностью организации многостанционного доступа в канале вверх является отказ от OFDMA, поскольку при сложении множества ортогональных поднесущих выходной сигнал имеет большой пик-фактор. Передача сигнала, характеризующегося большим пик-фактором без искажений, требует применения высоколинейного, а значит, дорогостоящего усилителя. Для упрощения (удешевления) терминалов применили технологию SC-FDMA – мультиплексирование на одной несущей, что существенно снижает пик-фактор.

6.1.3. Управление мощностью

Используемый в LTE модифицированный алгоритм управления мощностью позволяет абонентской станции работать с большей спектральной эффективностью, кроме того, справляться с внутрисистемной интерференцией посредством подавления соканальных помех.

6.1.4. Частотно-селективная диспетчеризация

Частотно-селективная диспетчеризация делает доступным весь набор поднесущих для каждой базовой станции сети

LTE. Применительно к абонентам, ограничение на используемый набор поднесущих имеют только те, кто находится на краю соты: абонентам на краях сот выделяются ресурсы только из определенных поддиапазонов, чтобы избежать интерференции сигналов от абонентов соседних сот.

6.1.5. Технология MIMO и кодирование

Технология MIMO предусматривает в канале вниз до четырёх пространственных каналов (4×4) при поддержке абонентским приемником четырехканального приема, а в канале вверх - только один (1×2).

Таким образом, в LTE Rel.8 реализована поддержка пространственного мультиплексирования для нескольких пользователей MU-MIMO.

Технология MIMO в сетях LTE используется несколько расширено. На основании информации о параметрах канала распространения радиоволн на передающей и на приемной сторонах формируются пространственные каналы распространения сигнальных потоков таким образом, чтобы минимизировать их взаимную интерференцию. Результатом является значительное повышение энергетического бюджета соединения. Эту технологию называют MIMO с обратной связью CL-MIMO (англ. Closed Loop MIMO - MIMO с обратной связью). На основании оценивания параметров канала в приемнике выбирается соответствующая прекодирующая матрица, номер которой и отправляется передатчику.

Предшествующая обработке CL-MIMO схема канального кодирования отличается от классической последовательной. В CL-MIMO используется параллельное канальное кодирование (рис. 32).

Параллельное кодирование предполагает демультиплексирование входных данных на два потока, каждый из которых в отдельности проходит помехоустойчивое кодирование. Далее символьные потоки распределяются по антенным портам MIMO. На приемной стороне осуществляются обратные операции: после

обработки потока канальным декодером данные снова поступают в обработчик MIMO, тем самым выполняется итерационный алгоритм совместной демодуляции MIMO и канального декодирования. Механизм существенно улучшает работу приемника и снижает требуемое отношение сигнал/шум. Этот механизм называют алгоритмом последовательного исключения демодулированных компонент SIC (англ. Successive Interference Cancellation - последовательная отмена помех).

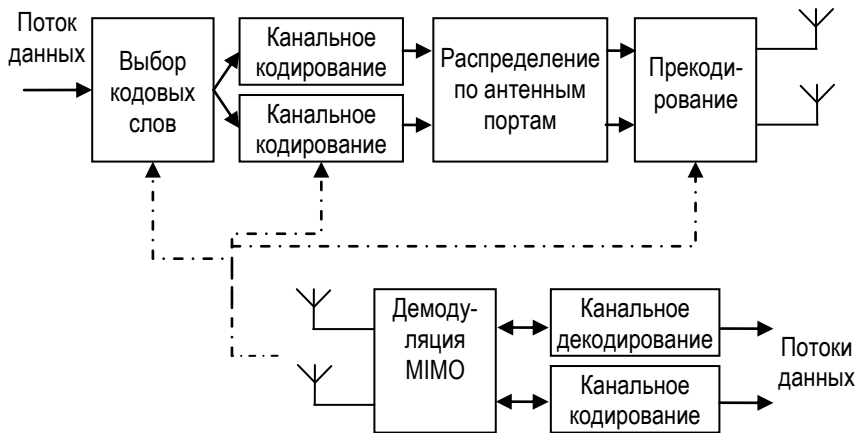


Рис. 32. Схема MIMO в системе LTE

Итерационный алгоритм демодуляции MIMO и канального декодирования при последовательном канальном кодировании нереализуем.

Реальные скорости потока данных для абонента определяются многими факторами:

- загруженность сети,
- радиочастотной обстановкой в соте,
- удаленностью абонента от базовой станции,
- количеством активных абонентов в соте,
- скоростью перемещения абонента,
- типом передаваемого трафика и пр.

Даже при 10 активных абонентах в соте скорость доступа может снижаться до 4 Мб/с, а на границе соты - и до 1 Мб/с.

В табл. 8 приведены описанные технологии и их влияния на эффективность работы сети доступа LTE Rel.8.

Таблица 8

Свойства технологий LTE

Технология	Реализация в LTE	Классический механизм	Влияние на систему
Эволюционная архитектура	Плоская модель	Многоуровневая иерархия	Снижение задержки
Многостанционный доступ	OFDMA на канале вниз, SC-OFDMA на канале вверх	OFDMA	Снижение пик-фактора, проще терминал
Технология	Реализация в LTE	Классический механизм	Влияние на систему
Управление мощностью	Частичное управление	Классическое управление	Повышение спектральной эффективности
MIMO	CL-MIMO, параллельное кодирование	MIMO без обратной связи, последовательное кодирование	Энергетический выигрыш
Частотно-селективная диспетчеризация	Коэффициент переиспользования частот равен 1	Коэффициент равен 3	Повышение спектральной эффективности
Адаптация мощности	Высокая точность (1 дБ)	Грубая точность (2-3 дБ)	Повышение спектральной эффективности
Диспетчеризация частотных ресурсов	Селективная	Рандомизированная	Энергетический выигрыш
Заголовки служебной информации	Малые	Большие	Повышение спектральной эффективности

6.2. Технологии LTE-Advanced

Стандарт LTE-Advanced (LTE-A) является дальнейшим развитием LTE и позволяет нарастить емкость сетей, улучшить распределение сетевых ресурсов. В частности, максимальная скорость доступа в канале вниз (с полосой 70 МГц) составляет 1 Гб/с, в канале вверх - 500 Мб/с.

Рассмотрим подробнее основные технологии LTE- A:

- агрегация частот,
- улучшенное использование MIMO,
- релейный режим включения базовых станций.

1. Агрегация частот позволяет абонентам загружать данные с использованием нескольких полос частот, благодаря чему достигается более высокая скорость. Объединение до 5 несущих полос шириной по 20 МГц каждая, в итоге полоса равна 100 МГц. Полосы могут быть смежными и несмежными, и даже из различных диапазонов. Технология агрегации частот не является новой для LTE-A – впервые агрегация предложена в 1xEV-DO.

2. В LTE-A для увеличения скорости доступа абонента доступны восемь уровней в канале вниз при наличии восьми приемников в абонентском оборудовании (8×8). В канале вверх предусмотрена поддержка до 4 передатчиков (4×4). Т.е. имеет место и SU-MIMO и MU-MIMO.

3. Релейный режим включения базовых станций позволяет наращивать покрытие сети в местности в отсутствие оптоволоконных каналов связи. В этом случае опорной (транспортной) сетью является радиоподсистема LTE-A.

Дополнительно в LTE-A описаны технологии:

- CoMP - (англ., Coordinated Multipoint Transmission - координированная передача и прием), технология координированного многостанционного приема и передачи. Технология CoMP предусматривает прием (при необходимости передачу) сигналов с абонентской станции несколькими координированными базовыми станциями.

Является альтернативой технологии ММО, в которой необходимо увеличение количества антенн базовой станции. CoMP не требует монтажа дополнительных антенн (и оборудования) и может применяться в существующих сетях доступа. Пропускная способность сети доступа увеличивается за счет более эффективного использования инфраструктуры сети.

- SON - (англ., Self-organizing network - самоорганизующаяся сеть), автоматическая оптимизация сети. Технология позволяет на основе мониторинга сети доступа автоматизировать рутинные операции в масштабах всей сети. Функции SON: поддерживать актуальность прописки «соседей» для исключения обрывов при эстафетной передаче, оперативно балансировать нагрузку между базовыми станциями, управлять покрытием (включая изменение углов наклона антенн), а также выявлять и устранять различные проблемы конфигурации – некорректные идентификаторы сот, конфликты, ошибки секторов и т.п.

В табл. 9 приведены сравнительные характеристики спектральной эффективности для стандартов LTE и LTE-A (при расстоянии между станциями 500 м, загрузке 5%, 10 активных абонентов, скорости перемещения 3 км/ч).

В дополнение к диапазонам, определенным для LTE (см. табл. 7), в LTE-A приведены следующие диапазоны:

- 450-470 МГц;
- 698-862 МГц;
- 790-862 МГц;
- 2,3-2,4 ГГц;
- 3,4-4,2 ГГц;
- 4,4-4,99 ГГц.

Отметим, диапазон 450-470 МГц позволит сетям доступа LTE-A обеспечить покрытие территории с радиусом до 50 км одной базовой станцией, что является решением проблемы обеспечения доступа для слабозаселенной (сельской) местности. Использование диапазона 450-470 МГц позволяет отнести

сети LTE-A к региональным сетям доступа WRAN. Но это перспектива, какова же будет реализация (IEEE 802.22 или LTE) в России покажет время.

Таблица 9

Характеристики LTE, Advanced LTE и IMT Advanced

Характеристика		LTE	LTE-Advanced
Спектральная эффективность пиковая, бит/с/Гц	канал вниз	16,3 (4×4 MIMO)	30 (8×8 MIMO)
	канал вверх	4,32 (64 KAM SISO)	15 (4×4 MIMO)
Спектральная эффективность канала вниз соты, бит/с/Гц	2×2 MIMO	1,69	2,4
	4×4 MIMO	2,67	3,7
Спектральная эффективность канала вниз на границе соты, бит/с/Гц	2×2 MIMO	0,05	0,07
	4×4 MIMO	0,08	0,12

7. Технологии Wi-Fi - стандарт IEEE 802.11ac

В окончательном виде стандарт IEEE 802.11ac принят в 2014 году.

Максимальная пропускная способность стандарта (диапазон 5 ГГц, ширина канала 80 МГц):

- для одной станции - не менее 500 Мбит/с,
- для нескольких станций - не менее 1 Гбит/с.

Минимальные требования к оборудованию стандарта 802.11.ac: скорость 293 Мб/с в полосе 80 МГц для одного пользователя.

7.1. Пропускная способность

В стандарте IEEE 802.11ac заложена поддержка обратной совместимости с устройствами стандартов IEEE 802.11a/n.

Скорость беспроводного доступа стандарта 802.11ac определяется тремя составляющими:

- полоса пропускания канала,
- плотность сигнального созвездия,

– количество пространственных потоков.

В табл. 10 представлена сравнительная характеристика стандартов семейства IEEE 802.11 с учетом класса абонентских устройств.

Таблица 10

Пропускная способность стандартов IEEE 802.11a/n/ac
по классам

Номинальная конфигурация (класс) устройств	Полоса канала, МГц	Количество пространственных потоков	Сигнальное созвездие и скорость кодирования	Защитный интервал	Скорость потока на физическом уровне, МБ/с
1	2	3	4	5	6
802.11a					
Максимально возможная	20	1	64КАМ 3/4	длинный (800 мкс)	54
802.11n					
Минимально возможная	20	1	64КАМ 5/6	длинный (800 мкс)	65
Низкий класс (только 2.4 ГГц)	20	1	64КАМ 5/6	короткий (400 мкс)	72
Средний класс	40	2			300
Высокий класс	40	3			450
802.11ac					
Минимально возможная	80	1	64КАМ 5/6	длинный (800 мкс)	293
Низкий класс	80	1	256КАМ 5/6	короткий (400 мкс)	433
	160				867
Средний класс	80	2			867

Номинальная конфигурация (класс) устройств	Полоса канала, МГц	Количество пространственных потоков	Сигнальное созвездие и скорость кодирования	Защитный интервал	Скорость потока на физическом уровне, Мб/с
1	2	3	4	5	6
802.11ac					
Высокий класс	160				1730
	80	3			1300
	160				2600
	160	4			3470
	80	8			3470
Максимально допустимая	160	8			6930

7.2. Формирование частотных каналов

Стандарт IEEE 802.11ac определяет работу оборудования только в диапазоне 5 ГГц, в отличие от устройств 802.11n, захватывающих и диапазон 2,4 ГГц. Отказ от 2,4 ГГц обусловлен сильной «заселенностью» диапазона, соответственно - значительными помехами.

Все каналы IEEE 802.11ac размещаются в трёх сегментах диапазона (рис. 33):

- 5,170 - 5,330 ГГц;
- 5,490 - 5,730 ГГц и
- 5,735 - 5,835 ГГц.

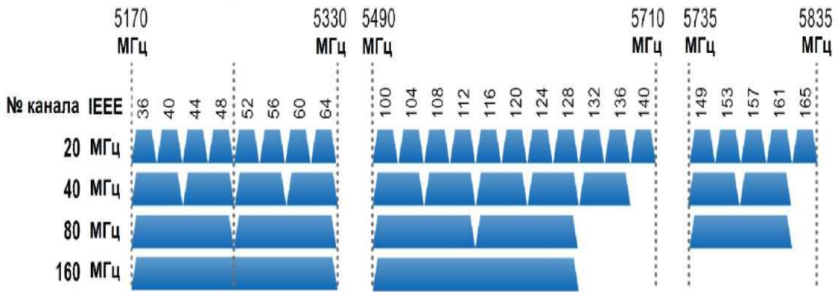


Рис. 33. Распределение каналов в сегментах диапазона

В стандарте 802.11ac предусмотрена обязательная агрегация смежных каналов: каналы 20 МГц сгруппированы попарно для получения каналов 40 МГц, каналы 40 МГц сгруппированы попарно для получения каналов 80 МГц. Стандарт допускает агрегацию двух смежных/несмежных каналов 80 МГц в один 160 МГц. Всего максимально поддерживается (см. рис. 33) до 24 каналов 20 МГц, до 11 каналов 40 МГц, до 5 каналов 80 МГц, 2 канала 160 МГц. Пример использования двумя точками доступа каналов в одной полосе 80 МГц, но с различными первичными каналами отражен на рис. 34.

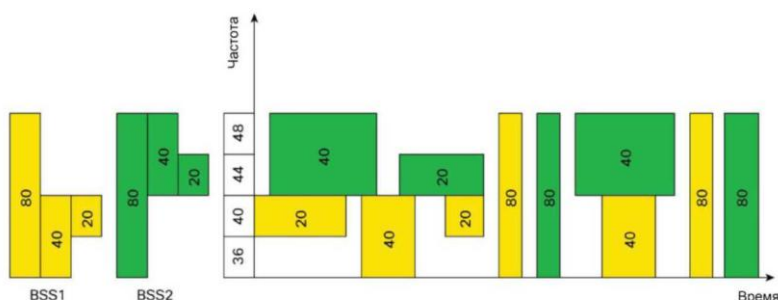


Рис. 34. Пример параллельных передач двух точек доступа

Возможность работы с перекрытием каналов (но при различных первичных каналах) возможна при соблюдении следующих условий:

- в 802.11ac повышена чувствительность для обнаружения сигналов на вторичных каналах,
- в механизм обмена RTS/CTS включена индикация пропускной способности каналов.

Рассмотрим варианты каналов: два по 80 МГц и один 160 МГц. Вариант 80+80 МГц имеет 10 возможных комбинаций (см. рис. 33) по сравнению с двумя возможными для 160 МГц, т.е. тайм-слотов, когда можно использовать канал 160 МГц, значительно меньше. С другой стороны, устройства, поддерживающие прием/передачу 80+80 МГц технически

сложнее, поскольку содержат вдвое больше радиочастотных компонентов. Кроме того, такое устройство может работать в двух режимах: с поддержкой двух пространственных потоков 80 МГц либо с одним пространственным потоком и каналами 80+80 МГц.

7.3. Формат кадра

Формат преамбулы в стандарте 802.11ac доступен для восприятия устройствами предыдущих спецификаций, что позволяет последним извлечь из преамбулы информацию о длительности передачи устройством 802.11ac, и не передавать во время его передачи.

7.4. Особенности реализации OFDM

В 802.11ac количество OFDM-поднесущих сигнала зависит от используемой полосы канала (см. табл. 11). Часть поднесущих используется как пилотные.

Из-за преамбулы в каждом канале 20 МГц, необходимой для совместимости с устаревшими устройствами 802.11a/n, появляется проблема пик-фактора. Для устранения этот эффекта, фаза верхних поднесущих (см. табл. 11) в каналах 20 МГц смещается (см. табл. 12).

Таблица 11

Распределение поднесущих

Полоса, МГц	Количество поднесущих	Поднесущие, на которых передаётся сигнал	Пилотные поднесущие (в VHT-LTF)
20	64	с -28 по -1 и с 1 по 28	$\pm 7, \pm 21$
40	128	с -58 по -2 и с 2 по 58	$\pm 11, \pm 25, \pm 39$
80	256	с -122 по -2 и с 2 по 122	$\pm 11, \pm 39, \pm 75, \pm 103$
160	512	с -250 по -130, с -126 по -6, с 6 по 126 и со 130 по 250	$\pm 25, \pm 53, \pm 89, \pm 117, \pm 139, \pm 167, \pm 203, \pm 231$
80+80	2x256	Как и в 80 МГц	Как и в 80 МГц

Таблица 12

Смещение фазы поднесущих в зависимости от полосы канала

Полоса, МГц	Поднесущие со смещаемой фазой	Величина смещения
20	Нет	-
40	>0	90 градусов
80	>-64	180 градусов
160	с -192 по -1 и >64	180 градусов
80+80	те же, что в 80 МГц	та же, что и в 80 МГц

7.5. Схемы модуляции и кодирования

Стандарт 802.11ac поддерживает модуляций BPSK, QPSK, 16КАМ и 64КАМ (как и в 802.11n), но и предоставляет возможность работы с модуляцией 256КАМ при полосе канала 80 МГц и 160 МГц. 256КАМ не требует большей полосы канала (чем 64КАМ), но требует «чистого» канала, поэтому актуальна на коротких расстояниях.

В 802.11ac количество индексов модуляции и кодирования значительно снижено (см. табл. 13): для абонента установлены только 10 схем модуляции и кодирования MCS (англ., Modulation and Coding Scheme - схемы модуляции и кодирования). Для сравнения – у 802.11n их количество 77.

Таблица 13

Схемы модуляции и кодирования в 802.11ac

MCS	Модуляция	Скорость кодирования
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16КАМ	1/2
4	16КАМ	3/4
5	64КАМ	2/3
6	64КАМ	3/4
7	64КАМ	5/6
8	256КАМ	3/4
9	256КАМ	5/6

Поддержка несимметричных видов модуляции не нашла значительного применения в устройствах 802.11n, поэтому в 802.11ac не предполагаются несимметричные виды модуляции. Т.е. в многопоточной передаче все потоки должны иметь один вид модуляции.

7.6. Технология MU-MIMO

Помимо имеющегося в предыдущей спецификации режима SU-MIMO, обеспечивающего увеличение скорости доступа одного пользователя, в IEEE 802.11ac реализована технология многопользовательского MU-MIMO (рис. 35). MU-MIMO допускает использование до 8 пространственных потоков, разделяемых 4 точками доступа (при ограничении на одну точку доступа - не более 4 потоков). Увеличение в сравнении с 802.11n количества пространственных потоков позволило удвоить максимальную пропускную способность сети 802.11ac.

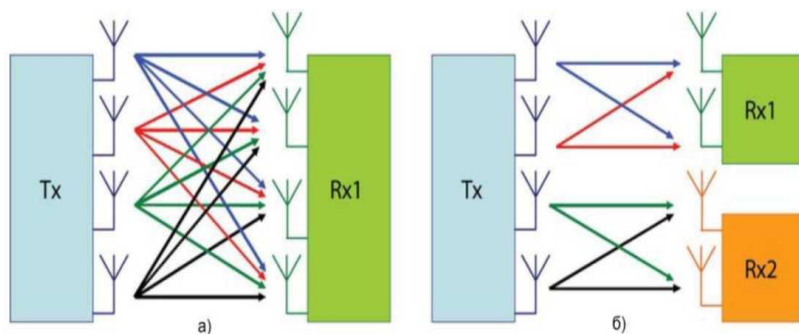


Рис. 35. Режимы SU- и MU-MIMO:

- а) Режим SU-MIMO, один пользователь, 4 пространственных потока, б) Режим MU-MIMO, два пользователя, 2 пространственных потока к каждому

Пространственные потоки при прохождении через радиоканал объединяются в антенне, один из них является полезным, а остальные - представляют помехи. Помехи от

наложения «чужих» потоков устраняются посредством обработки в приёмнике.

Еще одна технология, реализованная в IEEE 802.11ac - Beamforming-MIMO, формирование луча в MIMO, позволяющая изменять диаграмму направленности антенны, адаптируя её под конкретного абонента. Рассмотрим работу точки доступа в режиме формирования луча при работе с тремя абонентскими станциями (рис. 36). Для передачи данных абоненту 1, точка доступа формирует к нему мощный луч (диаграммы направленности антенны) - синяя кривая, верхний лепесток. При этом в направлении абонента 2 и 3 энергия луча 1 минимизируется (на рис. 36 показано вырезами в кривой синего цвета). Таким же образом формируются сигналы абонентам 2 и 3 (красная и жёлтая кривые): максимум луча направлен на «своего» абонента, вырезы - на «чужого» абонента.

Каждый из абонентов 1, 2 и 3 принимает сильный сигнал, в незначительной степени повреждённый наложением сигнала от других абонентов. Этот механизм называют «нулевым управлением», т.е. управление положением нуля диаграммы направленности антенны.

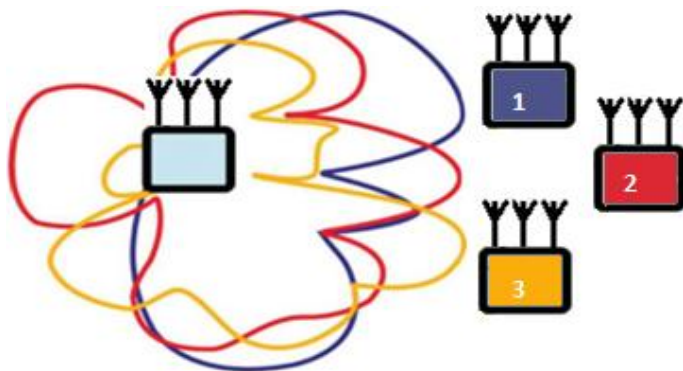


Рис. 36. Механизм «нулевого управления» в MU-MIMO

Реализация механизма «нулевого управления» в MU-MIMO достаточно сложна. И требует очень точных сведений о характеристиках беспроводного канала доступа к каждому абоненту. Эти сведения должны постоянно обновляться, поскольку характеристики радиоканала изменяются с течением времени. Их измерения и передача потребляют дополнительные, накладные расходы.

MU-MIMO имеет недостаток. Время, в течение которого канал занят, определяется самым медленным абонентом. Новый поток не может быть передан ни одним из абонентов, пока не будут закончены все передачи в многопользовательской группе MU-MIMO. В случае значительного отличия в пропускной способности (или объеме передаваемой информации) станций группы эффективность использования беспроводной среды будет низкой.

Технология MU-MIMO требует сложной обработки сигнала, а, значит, дорогостоящего оборудования (в том числе, абонентского). Поэтому технология MU-MIMO включена в стандарт 802.11ac как необязательная (дополнительная).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На текущий момент актуальным направлением развития телекоммуникационных систем является высокоскоростной беспроводной абонентский доступ.

Стандарты беспроводного доступа охватывают широкий спектр пользовательских устройств, распределяются по дальности действия (зоне охвата) и скорости передачи информации. Согласно классификации, зона доступа составляет от нескольких метров (сети семейства WPAN) до сотен километров (глобальные сети семейства WWAN). Наиболее актуальными являются сети локального доступа (семейство WLAN) и сети масштаба города (семейство WMAN), яркими представителями последних являются стандарт IEEE802.11ac (Wi-Fi) и LTE соответственно.

Процесс активного развития систем беспроводного доступа выработал множество эффективных технологий обработки сигнала для получения высоких скоростей передачи информации. Эти технологии нашли применение во многих современных стандартах абонентского беспроводного (впрочем, и кабельного) доступа.

В учебном пособии рассмотрены факторы, определяющие пропускную способность канала доступа, методы ее повышения, моделирование распространения радиосигнала в условиях плотной городской застройки.

Значительное место отведено технологическим решениям обработки сигнала в широкополосных сетях доступа, рассмотрены, в частности: технологии квадратурной модуляции, кодового разделения, ортогонального частотного мультиплексирования, пространственного мультиплексирования, частотно-селективная диспетчеризация, когнитивность и пр.

Особое внимание уделено технологиям, реализованным в стандартах беспроводного доступа Wi-Fi и LTE.

Полное освоение дисциплины предполагает помимо изучения изложенного выше теоретического материала вы-

полнение цикла лабораторных работ, методические указания к которым изданы ранее в электронном виде. Лабораторные работы нацелены на исследование технологий обработки сигнала в имитационной среде математического моделирования Simulink MATLAB.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспроводные сети Wi-Fi (2-е изд.) / А.В. Пролетарский, И.В. Баскаков, Р.А. Федотов и др. - М.: НОУ "ИНТУИТ", 2016. - 284 с.
2. Карташевский В.Г. Сети подвижной связи / В.Г. Карташевский, С.Н. Семёнов, Т.В. Фирстова. – М.: Эко-Трендз, 2001. - 281 с.
3. Волков А.Н. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения / А.Н. Волков, А.Е. Рыжков, М.А. Сиверс. - СПб.: Издательство «Линк», 2008. - 224 с.
4. Мерритт М. Безопасность беспроводных сетей / М. Мерритт. - М.: Книга по Требованию, 2015. - 282 с.
5. Методические указания к выполнению цикла лабораторных работ по дисциплине "Технологии беспроводного доступа в телекоммуникационных системах" для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") и дисциплине «Технологии телекоммуникационных систем» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» сост. В.В. Жилин. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 50 с.
6. Рассел Дж. Безопасность в беспроводных самоорганизующихся сетях / Дж. Рассел. – М.: VSD, 2012. – 274 с.
7. Сети UMTS: архитектура, мобильность, сервисы / Кааранен Х., Ахтиайнен А., Лаитинен Л. и др. - М.: Техносфера, 2007. - 464 с.
8. Ипатов В.П. Системы мобильной связи: учебное пособие для вузов / В.П. Ипатов, В.К. Орлов, И.М.Самойлов, В.Н. Смирнов; под ред. В.П. Ипатова. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. - 272 с.
9. Кузнецов М.А. Современные технологии и стандарты подвижной связи / М.А. Кузнецов, А.Е. Рыжков. – СПб.: Линк, 2009. - 128 с.

10. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
11. Тихвинский В.О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев. – М.: Эко-Трендз, 2007.
12. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2008. – 288 с.
13. Шубин В.И. Беспроводные сети передачи данных / В.И. Шубин, О.С. Красильникова. - М.: Вузовская книга, 2013. - 104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Обозначения и сокращения.....	5
1. Факторы, определяющие скорость в сетях беспроводного доступа	11
1.1. Распространение в среде общего пользования	11
1.2. Многолучевая интерференция.....	11
1.3. Частотно-зависимое затухание.....	13
1.4. Доплеровский эффект.....	14
2. Методы увеличения скорости беспроводного канала доступа	15
2.1. Пропускная способность радиоканала	15
2.2. Множественный доступ с кодовым разделением CDMA	17
2.3. Модуляция КАМ.....	19
2.4. Формирование и свойства КАМ-сигналов	21
3. Основные технологические решения обработки сигналов в сетях беспроводного доступа.....	27
3.1. Процедуры формирования сигнала в канале связи	27
3.2. Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием OFDM.....	29
3.3. Разнесенный прием.....	32
3.3.1. Пространственное разнесение.....	34
3.3.2. Частотное разнесение.....	35
3.3.3. Временное разнесение	35
3.3.4. Многолучевое разнесение	35
3.3.5. Поляризационное разнесение.....	36
3.4. Канальное кодирование.....	37
3.4.1. Блочное кодирование	38
3.4.2. Сверточное кодирование	39
3.4.3. Перемежевание.....	41
3.4.4. Скремблирование	41
3.4.5. Медленные скачки.....	42

3.5.	Управление мощностью излучения	42
3.5.1.	Классический алгоритм. Эффект «дыхания» соты	42
3.5.2.	Модифицированный алгоритм управления мощностью	45
3.6.	Прием/передача множеством антенн	45
3.7.	Частотно-селективная диспетчеризация.....	49
3.8.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи ..	51
4.	Моделирование распространения радиосигналов в условиях многократных отражений	52
4.1.	Методы моделирования распространения радиоволн	53
4.2.	Модели распространения радиоволн	55
4.2.1.	Модель свободного пространства.....	55
4.2.2.	Модель Ли	56
4.2.3.	Модель Хата.....	56
4.3.	Программные средства проектирования сетей беспроводного доступа	58
5.	Актуальные стандарты беспроводного доступа.....	61
5.1.	Сети WPAN - семейство стандартов IEEE 802.15	61
5.2.	Сети WLAN - семейство стандартов IEEE802.11 Wi-Fi	64
5.3.	Сети WMAN - стандарт сотовой связи UMTS (WCDMA).....	67
5.4.	Сети WMAN - семейство стандартов IEEE 802.16 WiMAX	73
5.4.1.	Эволюция стандартов IEEE 802.16	73
5.4.2.	Общая характеристика сетей WiMAX	75
5.5.	Сети WMAN - стандарт сотовой связи LTE.....	77
5.6.	Сети WRAN - когнитивное радио IEEE 802.22	79
5.6.1.	Когнитивность сетей стандарта IEEE 802.22.....	79
5.6.2.	Общая характеристика сетей IEEE 802.22	81
5.7.	Сети WWAN - спутниковый доступ	84

6.	Технологии стандарта беспроводного доступа LTE.....	89
6.1.	Базовые технологии LTE.....	89
6.1.1.	Эволюция системной архитектуры.....	89
6.1.2.	Многостанционный доступ	90
6.1.3.	Управление мощностью	90
6.1.4.	Частотно-селективная диспетчеризация	90
6.1.5.	Технология MIMO и кодирование.....	91
6.2.	Технологии LTE-Advanced	94
7.	Технологии Wi-Fi - стандарт IEEE 802.11ac.....	96
7.1.	Пропускная способность.....	96
7.2.	Формирование частотных каналов.....	98
7.3.	Формат кадра.....	100
7.4.	Особенности реализации OFDM	100
7.5.	Схемы модуляции и кодирования	101
7.6.	Технология MU-MIMO	102
	Заключение	105
	Библиографический список	107

Учебное издание

Жилин Владимир Васильевич

**ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Подписано к изданию 13.03.2018.

Объем данных 1,8 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14