

## РАЗДЕЛ 3 ПАКЕТНЫЕ РАДИОСЕТИ

### 3.1. ИЕРАРХИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В результате бурного развития компьютерных сетей и стремления к их оперативному развертыванию появились системы беспроводного доступа к компьютерам, прежде всего, ориентированные на передачу пакетного трафика. Такие системы обеспечивают доступ по радиоканалам к Интернету, обмен файлами между пользовательскими устройствами и управление устройствами различного назначения. Данные системы подчиняются специально разработанным стандартам и отличаются логической иерархией, основанной на масштабе зоны обслуживания (рис. 3.1), начиная от систем персонального доступа PAN – Personal Area Network (семейство стандартов IEEE 802.15), действующих в пределах нескольких метров.

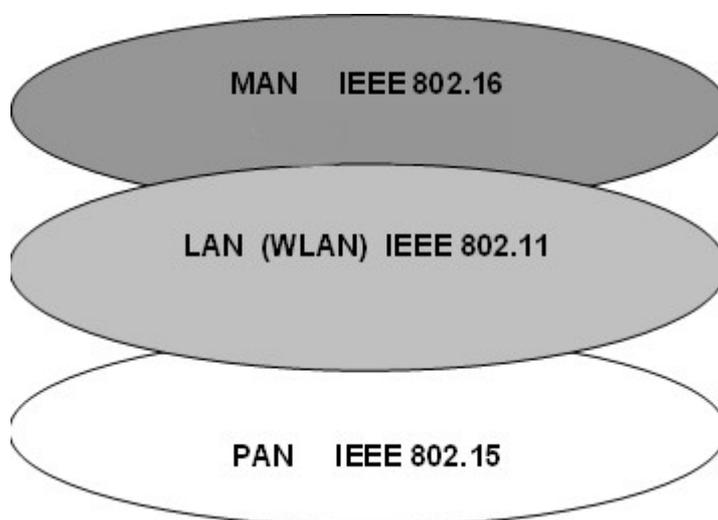


Рис. 3.1. Иерархия сетей беспроводного доступа.

Следующий уровень LAN – Local Area Network, представлен стандартом IEEE 802.11. Чтобы отличать беспроводные LAN от их кабельной конфигурации, эти сети обычно называют WLAN – Wireless LAN, беспроводный локальный доступ, а все модификации этого стандарта обобщенно обозначают коммерческим знаком Wi-Fi – Wireless Fidelity. WLAN позволяют организовывать беспроводный доступ к Интернету в зданиях, сооружениях, на открытом воздухе в местах скопления людей в радиусе нескольких сотен метров.

Сети уровня MAN – Metropolitan Area Network, ориентированы на организацию беспроводного доступа в отдельных “пятнах” на местности: в группе зданий, небольшом квартале, “соте”. Такое “пятно” покрывает сигнал одной базовой станции мощностью до нескольких ватт. На рынке связи сети MAN представлены стандартом IEEE 802.16, обеспечивающим радиус действия в несколько километров.

Следует отметить, что все перечисленные стандарты беспроводного доступа принадлежат к одному семейству IEEE 802.X, что позволяет

стандартизировать интерфейсы и существенно упростить межсистемные соединения беспроводных и кабельных (Ethernet, Token Bus, Token Ring) сетей связи.

### 3.2. СТАНДАРТ BLUETOOTH

Стандарт IEEE 802.15 (Bluetooth) – универсальный радиоинтерфейс, обеспечивающий связь на малых расстояниях нескольких электронных устройств. Используя Bluetooth, легко организовать временное соединение между компьютером и MS, между несколькими компьютерами, включая управляющие и исполнительные устройства.

Аппаратура Bluetooth работает в нелицензируемом ISM диапазоне 2,4...2,483 ГГц, где выделено 79 каналов шириной 1 МГц. Каналы пронумерованы:  $k = 0...78$ , центральные частоты каналов определяют по формуле

$$f_k = 2402 + k \text{ (МГц)}.$$

Сквозная скорость в радиотракте 1 Мбит/с. При передаче по радиоканалу используют Гауссову ЧММС в целях повышения спектральной эффективности и компактности спектра. По мощности передатчиков устройства Bluetooth делят на 3 класса (табл. 4.1). В устройствах 1-го класса предусмотрена обязательная регулировка уровня мощности от 20 до 4 дБм. Чувствительность приемника не хуже -70 дБм.

Таблица 4.1

Класс мощности	Максимальная выходная мощность		Минимальная выходная мощность		Дальность связи, м
	мВт	дБм	мВт	дБм	
1	100	20	1	0	100
2	2,5	4	0,25	-6	10
3	1	0	-	-	1

Соединения и пикосети Bluetooth построены по иерархическому принципу. В каждой сети есть ведущее устройство – мастер, и одно или несколько ведомых (slave), рис. 3.2. Мастер управляет процессом обмена информацией, устанавливает в сети временную синхронизацию, регулирует мощность передатчиков ведомых устройств. В пикосети к одному мастеру можно подключить до 7 активных ведомых. Вместе с тем, организация соединений в Bluetooth достаточно “демократична”: устройство, инициирующее обмен информацией, становится мастером.

Так как в диапазоне 2,4 ГГц, кроме Bluetooth работают сети стандартов IEEE 802.11b,g, а также разнообразная медицинская, домашняя (СВЧ печи) и другая аппаратура, возникает проблема защиты каналов связи от помех. Для этого в Bluetooth используют передачу с прыгающей частотой, меняющейся по псевдослучайному закону. Информацию в Bluetooth передают пакетами, размещаемыми во временных интервалах (ВИ) длительностью 625 мкс. В

каждом активном Bluetooth модуле работает таймер – счетчик ВИ. Полный цикл составляет  $2^{27}$  ВИ.

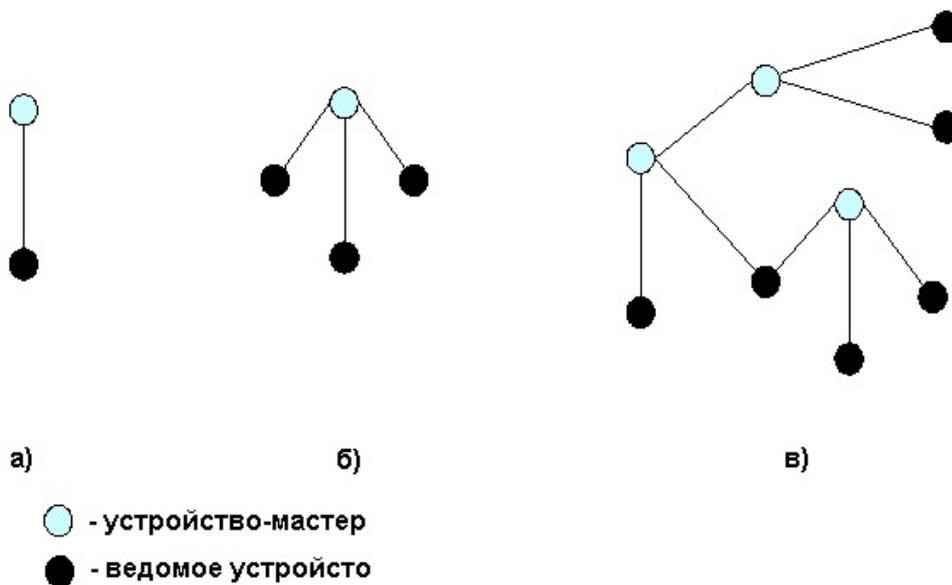


Рис. 3.2. Пикосети с соединением точка-точка (а), точка-многоточие (б) и пример организации распределенной сети (в)

Каждый следующий пакет передают на другой частоте в соответствии с часами мастера, под которые подстраиваются все ведомые устройства. Всего за одну секунду происходит 1600 переключений частоты.

Иерархия мастер–ведомый распространяется и на процесс обмена пакетами: **мастер размещает свои пакеты в четных ВИ, ведомый – в нечетных.**

Интерфейс Bluetooth поддерживает 2 типа соединений:

- синхронное, ориентированное на соединение, обозначаемое SCO (Synchronous Connection-Oriented),
- асинхронное, не ориентированное на соединение, обозначаемое ACL (Asynchronous Connection-Less).

В синхронном соединении участвуют 2 устройства: мастер и ведомый (рис. 3.2а). Для этого соединения резервируют каналный ресурс. На практике SCO используют для передачи речи, например, между MS и телефонной гарнитурой на голове абонента. На рис. 3.3 приведен пример временных диаграмм при синхронном соединении. Для передачи используют каждый шестой ВИ. Зарезервированный каналный ресурс позволяет организовать дуплексную связь со скоростью 64 кбит/с, что соответствует стандартной скорости передачи телефонии.

Каждый пакет HV3 на рис. 4.6 содержит 30 информационных байт, что поддерживает скорость передачи  $30 \cdot 8 / (6 \cdot 625 \cdot 10^{-6}) = 64$  кбит/с. Для улучшения качества связи можно передавать данные с кодовой защитой

с  $R_{\text{кода}} = 2/3$  и  $1/3$ . Тогда в одном направлении передачи на рис. 3.3 будет занят каждый

четвертый или каждый второй ВИ соответственно. Пакеты, используемые для передачи стандартного речевого сигнала, относят к типу HV (High Quality Voice). Кроме передачи речи, в синхронном соединении можно вести и обмен данными. Для этого используют пакеты типа EV. Характеристики синхронного соединения в Bluetooth приведены в табл. 3.2.

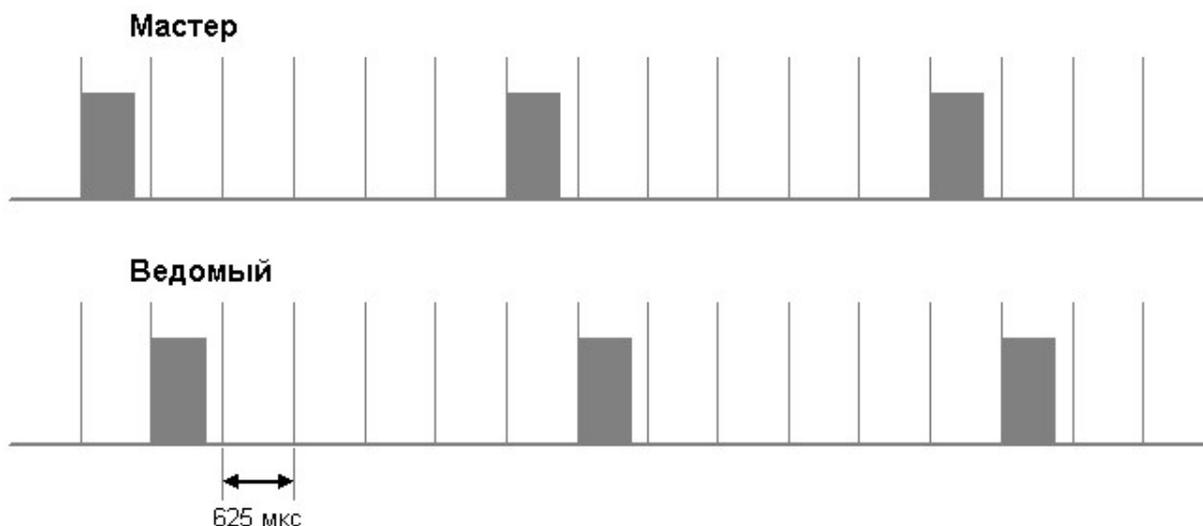


Рис. 3.3. Передача пакетов при синхронном соединении

Таблица 3.2.

Тип пакета	Информационная нагрузка в пакете, байт	$R_{\text{кода}}$	Макс. скорость в симм. канале, кбит/с
HV1	10	1/3	64
HV2	20	2/3	64
HV3	30	1	64
EV3	1 - 30	1	96
EV4	1 - 120	2/3	192
EV5	1 - 180	1	288

В асинхронных соединениях процессами обмена информацией управляет мастер. При этом можно реализовать режим точка – многоточие и мастер может работать с разделением во времени с 7 активными ведомыми (рис. 3.2б). Ведомое устройство не может самостоятельно выходить на связь; оно отвечает только в следующем ВИ после получения пакета мастера. В ACL соединениях возможна организация симметричных и асимметричных каналов. При симметричной передаче пакеты мастера и ведомого занимают 1 ВИ (DH1: Data-High Rate 1 или DM1: Data-Medium Rate 1), 3 ВИ (DH3, DM3) или 5 ВИ (DH5, DM5). При организации асимметричных каналов только пакеты мастера могут занимать 3 или 5 ВИ, пакеты ведомых всегда

ограничены 1 ВИ (рис. 3.4.). Характеристики асинхронных соединений приведены в табл. 3.3.

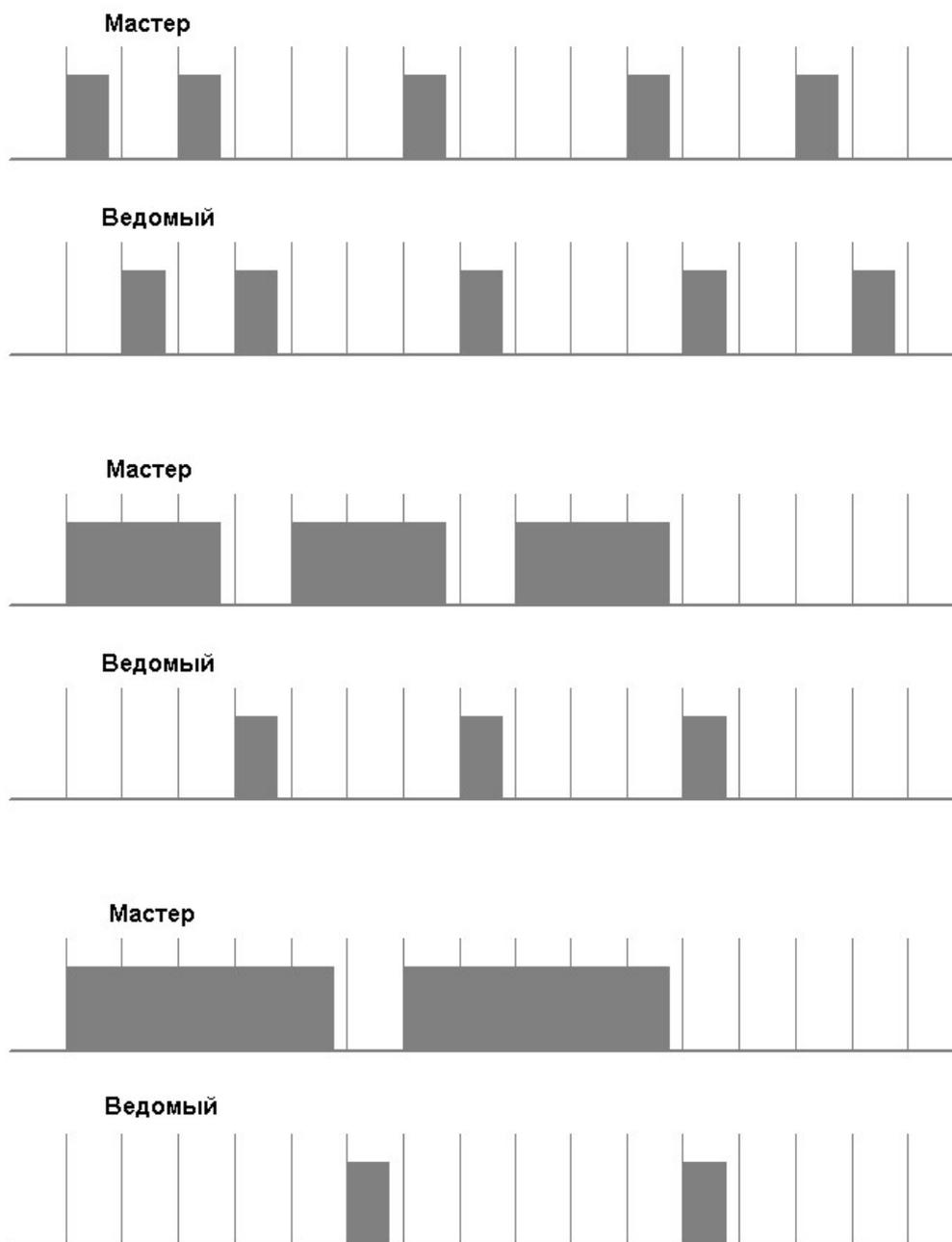


Рис. 3.4. Передача пакетов при асинхронном соединении

Таблица 3.3

Тип пакета	Информ. нагрузка в пакете, байт	$R_{\text{кода}}$	Симм. макс. скорость, кбит/с	Асимметр. макс. скорость, кбит/с	
				Прямой	Обратный
DM1	0 - 17	2/3	108,8	108,8	108,8

DH1	0 - 27	1	172,8	172,8	172,8
DM3	0 - 121	2/3	258,1	387,2	54,4
DH3	0 - 183	1	390,4	585,6	86,4
DM5	0 - 224	2/3	286,7	477,8	36,3
DH5	0 - 339	1	433,9	723,2	57,6

### 3.3. СТАНДАРТЫ IEEE 802.11 (WI-FI)

Беспроводные сети стандарта IEEE 802.11 работают в двух диапазонах: 2,4.....2,483 ГГц и в нескольких полосах вблизи 5 ГГц, которые являются нелицензируемыми. При этом возможны несколько вариантов топологий:

- независимые базовые зоны обслуживания (independent basic sets, IBSSs),
- базовые зоны обслуживания (basic service sets, BSSs),
- расширенные зоны обслуживания (extended service sets, ESSs).

Независимая базовая зона обслуживания представляет собой группу работающих в соответствии со стандартом 802.11 станций, связывающихся непосредственно одна с другой. IBSS также называют эпизодической или неплановой (ad-hoc), сетью. На рис. 3.5 показано, как три станции, оборудованные беспроводным сетевым интерфейсными картами (network interface card, NIC) стандарта 802.11, могут формировать IBSS и напрямую связываться одна с другой.

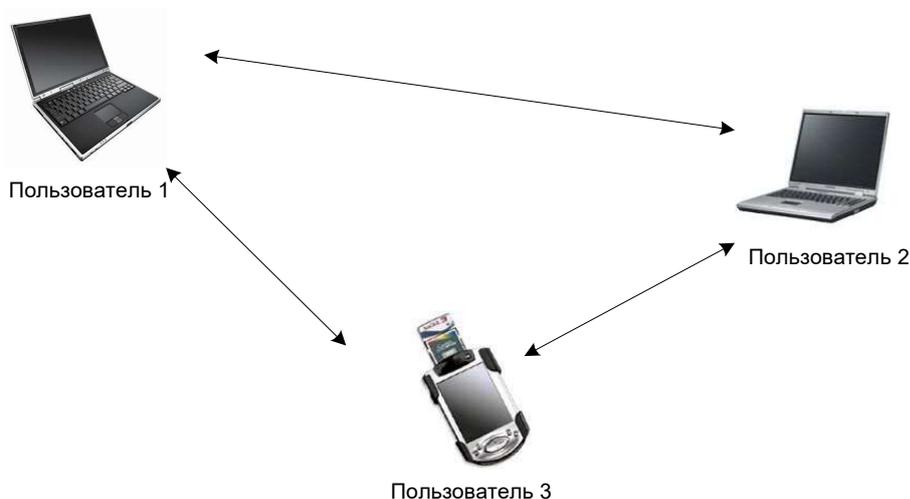


Рис. 3.5. Эпизодическая (ad-hoc) сеть

Технология базовых зон обслуживания предполагает наличие особой станции: **точки доступа AP (access point)**. Точка доступа – это центральный пункт связи для всех станций BSS. Станции клиентов не связываются непосредственно друг с другом. Вместо этого они передают сообщения точке доступа, а уже она направляет информационные пакеты станции-адресату. Точка доступа может иметь порт восходящего канала (uplink port), через который BSS подключают к проводной сети (например, восходящий канал

Ethernet для доступа к Интернету). Поэтому BSS называют сетью с инфраструктурой. На рис. 3.6 представлена типичная инфраструктура BSS.

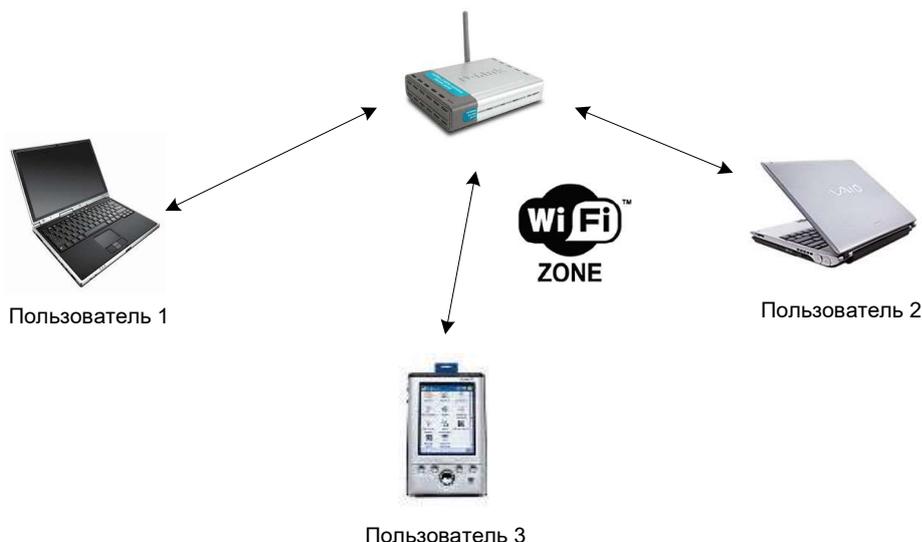


Рис. 3.6. Беспроводная локальная сеть с инфраструктурой

Несколько инфраструктур BSS могут быть соединены через их интерфейсы восходящего канала. Там, где действует стандарт 802.11, интерфейс восходящего канала соединяет BSS с распределительной системой (distribution system, DS). Несколько BSS, соединенных между собой через распределительную систему, образуют расширенную зону обслуживания (ESS). Восходящий канал к распределительной системе не обязательно должен использовать проводное соединение. Спецификации стандарта 802.11 позволяют построить этот канал как беспроводный. Но чаще восходящие каналы к распределительной системе представляют собой каналы проводной сети Ethernet. На рис. 3.7 представлен пример практического воплощения ESS.

Территорию, покрытую BSS или ESS с выходом в Интернет, называют hot spot (“горячей точкой”). “Горячие точки” создают в гостиницах, аэропортах, ресторанах, студенческих общежитиях и просто на улицах. В конце 2004 г. в мире работало около 50000 “горячих точек”, а число пользователей ими достигло 50 млн. человек. Быстрое распространение услуг WLAN и большое число производителей аппаратуры требует совместимости аппаратных и программных средств, предлагаемых различными фирмами. С этой целью в 1999 г. была создана организация WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), вскоре преобразованная в Wi-Fi Alliance. Он включает в себя разработчиков и производителей аппаратуры стандарта 802.11, операторов сетей, экспертов. Главная цель альянса – сертификация выпускаемой аппаратуры с целью обеспечения взаимодействия Wi-Fi устройств, производимых разными фирмами.



Рис. 3.7. Расширенная зона обслуживания ESS беспроводной локальной сети

Стандарт 802.11 имеет 3 варианта: 802.11a, b, g, n, ac. Во всех вариантах передачу информации ведут в пакетном режиме, отдельными кадрами (пакетами).

Аппаратура стандарта 802.11b работает в диапазоне 2,4...2,483 ГГц. Как было сказано, этот диапазон нелицензируемый и в нем действует много других систем и устройств. Для снижения влияния помех в сетях 802.11b предложено 2 способа. Первый – использование, как и в стандарте Bluetooth, прыгающей частоты при передаче каждого следующего кадра. Однако на практике обычно применяют другой способ: прямое расширение спектра путем заполнения информационных символов скремблирующим кодом.

В классическом варианте 802.11b информацию передают в виде символов со скоростью 1 Мсимв/с. При модуляции 2-ФМ скорость передачи информации в кадре составляет 1 Мбит/с, а при 4-ФМ 2 Мбит/с. При применении прямого расширения спектра каждый символ заполняют чиповой m-последовательностью из 11 чипов (код Баркера):  $+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1$ . Чиповая скорость в радиоканале составляет 11 Мчип/с, а ширина радиоканала – 22 МГц. В диапазоне 2,4 ГГц фиксированы центральные частоты 13 радиоканалов: 2412, 2417, 2422, 2427, 2432, 2437, 2442, 2447, 2452, 2457, 2462, 2467 и 2472 МГц. При приеме сигнал подвергают корреляционной обработке, что существенно снижает влияние помех, как в стандартах сотовой связи с кодовым разделением каналов.

Использование широкополосного канала позволяет при высоком отношении сигнал/помеха (15 – 17 дБ) увеличить скорость передачи данных. При этом отказываются от скремблирования, а данные передают с символьной скоростью 11 Мсимв/с с модуляцией 4-ФМ. Для повышения качества связи при передаче используют избыточное кодирование с помощью дополняющего кода ССК (Complementary Code Keying). Скорость передачи данных в кадре может составлять 11 или 5,5 Мбит/с.

Максимальная мощность передатчиков устройств стандарта 802.11b составляет в Европе 100 мВт, а в США 1 Вт.

Устройства стандарта 802.11a работают в трех поддиапазонах на 5 ГГц. В поддиапазоне 5,15...5,25 ГГц мощность передачи ограничена 50 мВт, в поддиапазоне 5,25... 5,35 ГГц – 250 мВт, а в поддиапазоне 5,725...5,825 ГГц – 1 Вт. В этих диапазонах выделено 12 каналов шириной 20 МГц.

Достоинством стандарта 802.11a и 802.11g в сравнении с 802.11b является повышенная скорость передачи данных в кадре: от 6 до 54 Мбит/с. Для этого в стандарте 802.11a применяют модуляцию OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по ортогональным частотам. Этот метод применяют для того, чтобы при высокой скорости передачи данных устранить межсимвольную интерференцию. Приведем характерный пример.

Пусть по радиоканалу идет передача с символьной скоростью  $V=40$  Мсимв/с. При передаче на одной несущей частоте длительность символа  $\tau_{\text{симв}} = 1/40 \cdot 10^6 = 25 \cdot 10^{-9}$  с. Представим себе ситуацию передачи такого сигнала в большом помещении (вокзал, аэропорт, торговый центр – рис. 3.8).

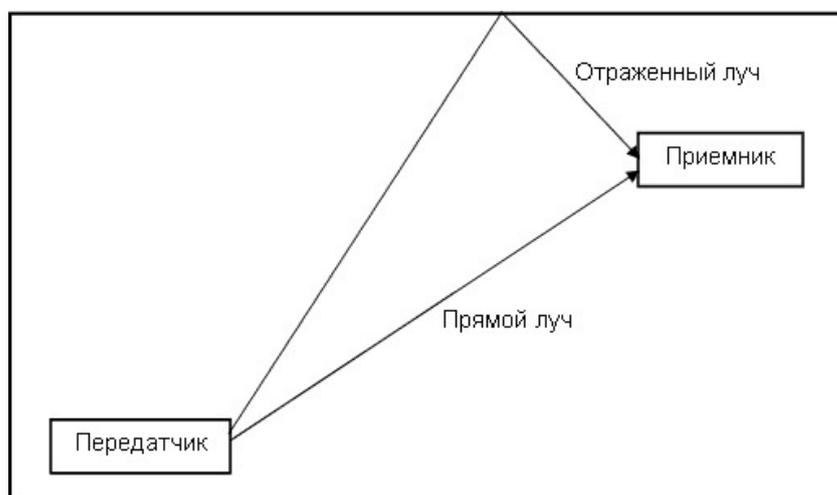


Рис.3.8. Многолучевое распространение сигналов.

Для того, чтобы прямой и обратный лучи приходили с запаздыванием в 1 символ, разность их хода должна составлять всего  $c \cdot \tau_{\text{симв}} = 3 \cdot 10^8 \cdot 25 \cdot 10^{-9} = 7,5$  м. Такое запаздывание можно наблюдать даже в достаточно большой комнате. Чтобы снять проблему межсимвольной интерференции, следует увеличить длину символа в 10, а еще лучше в 100 раз. Тогда межсимвольная интерференция будет заметна при разности трасс в 750 м. Отсюда следует

идея, положенная в основу OFDM: расщепить высокоскоростной поток данных на множество отдельных потоков (десятки!), передавать каждый из субпотоков на своей частоте (поднесущей), увеличив длину символа до единиц миллисекунд.

Технологию OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – ортогональное частотное разнесение, используют для устранения межсимвольной интерференции в высокоскоростных радиоканалах. Вместо того, чтобы передавать  $n$  информационных символов цифрового информационного сигнала (ЦИС) на одной несущей частоте их передают одновременно на  $n$  поднесущих частотах, размещенных в полосе радиоканала (рис. 3.9). Между символами вводят защитные промежутки такой длительности  $T_g$ , чтобы приходящие из-за многолучевого распространения радиоволн символы с запаздыванием не “наползали” на следующие. При этом длина каждого символа  $T_b$  увеличивается по сравнению с длительностью символа в исходной последовательности в  $nT_b/(T_b+T_g)$  раз.

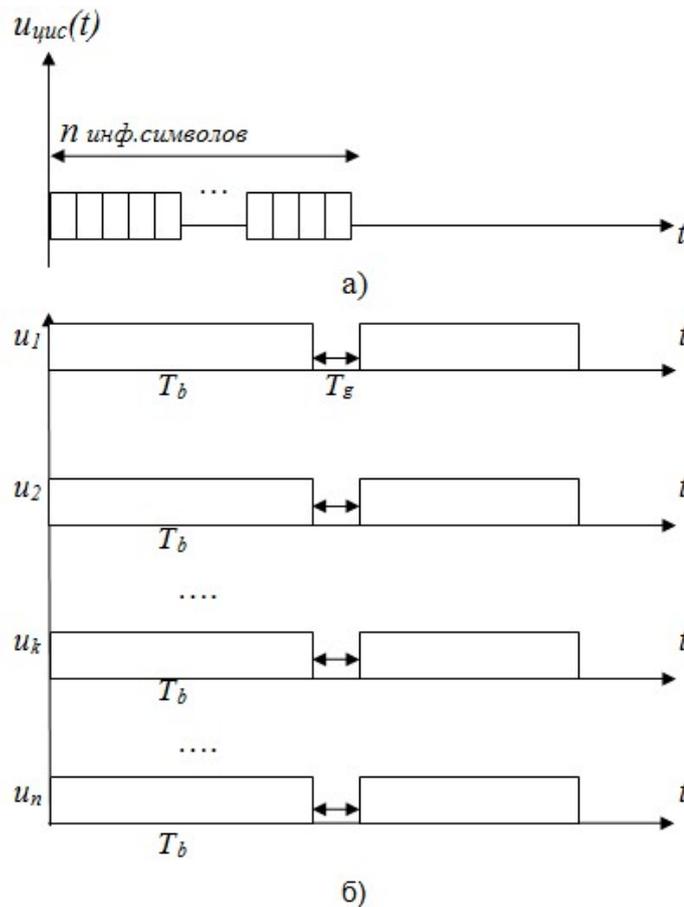


Рис. 3.9. Принцип технологии OFDM

В аналитическом виде сигнал OFDM представляет собой сумму гармоник:

$$u_{\text{OFDM}} = |s_1|e^{j\varphi_1}e^{j2\pi F_1 t} + |s_2|e^{j\varphi_2}e^{j2\pi F_2 t} + \dots + |s_k|e^{j\varphi_k}e^{j2\pi F_k t} + \dots \\ \dots + |s_n|e^{j\varphi_n}e^{j2\pi F_n t}$$

Все поднесущие являются гармониками основной частоты  $F_1$ :  $F_k = kF_1$ , а частота  $F_1$  жестко связана с длительностью символа:  $F_1 = 1/T_b$ . Следовательно, на временном отрезке  $T_b$  укладывается  $k$  волн поднесущей частоты  $F_k$ . Каждый символ  $S_k$  можно рассматривать как дискретный отсчет спектра на поднесущей  $F_k$ . Амплитуда  $k$ -той поднесущей –  $|S_k|$ , а фаза –  $\varphi_k$ . При формировании сигнала  $u_{OFDM}$  используют процедуру обратного (быстрого) преобразования Фурье. На рис. 3.10 показаны поднесущие с частотами  $F_1$  и  $F_2$  и нулевыми начальными фазами на временном интервале  $T_b$ .

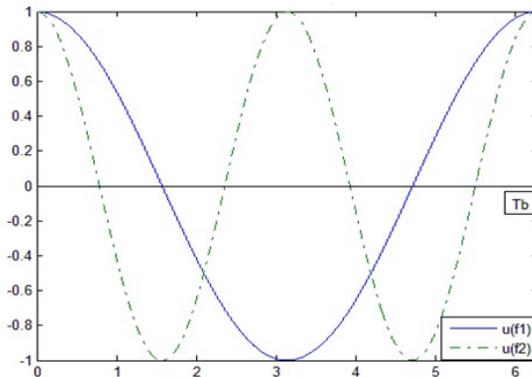


Рис.3.10. Две поднесущие на интервале  $0 - T_b$

Главной проблемой при применении технологии OFDM является обеспечение высокого отношения сигнал/помеха в приёмнике. Формально при приёме сигналов  $n$  поднесущих должны работать  $n$  независимых приёмников. Однако спектры сигналов на расположенных рядом поднесущих наложены друг на друга (рис. 3.11). Поэтому приём сигнала OFDM и выделение отдельных символов осуществляют с использованием процедуры прямого (быстрого) преобразования Фурье.

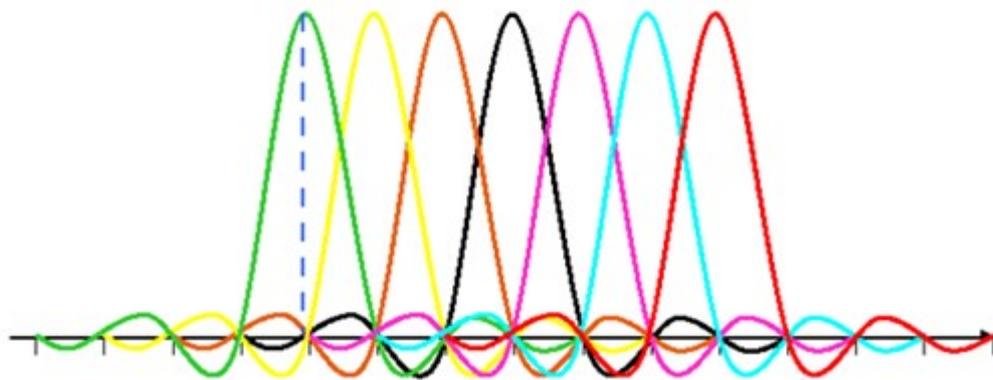


Рис. 3.11. Спектр фрагмента OFDM-сигнала

Рассмотрим, как работает приёмник  $k$ -ой поднесущей. Он выполняет процедуру прямого преобразования Фурье:

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} u_{OFDM} e^{-j2\pi(kF_1)t} dt \quad (3.1)$$

На частоте  $F_k = kF_1$

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |s_k| e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi(kF_1)t} e^{j2\pi(kF_1)t} dt = |s_k| e^{j\varphi_k} \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} dt = |s_k| e^{j\varphi_k} \quad (3.2)$$

На любой другой поднесущей  $F_p = pF_1$

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |s_p| e^{j\varphi_p} e^{j2\pi(pF_1)t} e^{-j2\pi(kF_1)t} dt = |s_p| e^{j\varphi_p} \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} e^{j2\pi(p-k)F_1 t} dt = 0, \quad (3.3)$$

поскольку интеграл (площадь) синусоиды за время одного периода равен 0 (рис. 3.12), а на интервале  $T_b$  уложено целое число  $|p-k|$  периодов синусоиды<sup>1</sup>.

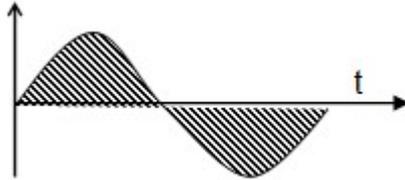


Рис.3.12. К определению площади синусоиды

Следовательно, при точном выборе времени интегрирования помехи от сигналов других поднесущих равны 0. Однако, при вычислении приведенных выше интегралов необходимо запускать функции  $e^{-j\pi(kF_1)t}$  с нулевой начальной фазой, т.е. обеспечить когерентный приём сигнала **U<sub>OFDM</sub>**.

В защитном интервале  $T_g$  между символами (рис. 3.9) передают циклический префикс (CP – Cyclic Prefix) – конец следующего символа длительностью  $T_g$  (рис. 3.13).

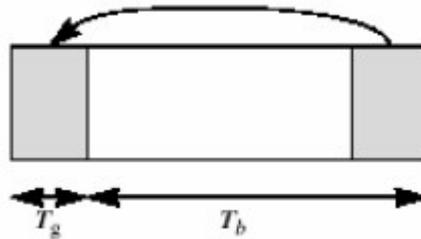


Рис. 3.13. OFDM-символ с циклическим префиксом

Это делают для **снижения внутрисимвольных помех** (внутрисимвольной интерференции). Если бы циклического префикса не было, то при вычислении интеграла (3.1) запаздывающие лучи, пришедшие после начала интегрирования, укладывались бы на временном отрезке  $0-T_b$ , нецелое число периодов поднесущих. В результате появлялась бы ошибка при вычислении интеграла (3.2), а интегралы (3.3) не обращались бы в нуль. При передаче CP при запаздывании луча не более, чем на  $T_g$ , на интервале интегрирования  $T_b$  на любой поднесущей оказывается целое число её периодов и интегралы (3.3) равны нулю. Чтобы при приеме можно было различать сигналы, передаваемые на соседних поднесущих, все сигналы должны быть взаимно ортогональны. Это условие выполнимо, если расстояние между соседними поднесущими  $\Delta F = \frac{1}{T_s}$ .

При передаче (формировании) OFDM сигнала используют обратное дискретное преобразование Фурье (обратное БПФ); при приеме – прямое дискретное преобразование Фурье (БПФ). Сигнал OFDM формируют на пониженной частоте с последующим переносом спектра на частоту радиоканала.

В стандарте 802.11a для передачи информации используют 48 поднесущих (всего 52). Длительность символа  $T_s=3,2$  мкс, длительность паузы  $T_p=0,8$  мкс. Расстояние между соседними частотами  $\Delta F = \frac{1}{T_s} = 0,3125$  МГц.

При модуляции 2-ФМ на каждой поднесущей скорость передачи данных (без защитного кодирования)

$$B_{2-ФМ} = 48 \cdot \frac{1}{(T_s + T_p)} = 48 \cdot \frac{1}{(3,2 + 0,8) \cdot 10^{-6}} = 12 \text{ Мбит/с.}$$

При переходе к многопозиционным методам модуляции

$$B_{4-ФМ} = 2 \cdot 48 \cdot \frac{1}{(T_s + T_p)} = 24 \text{ Мбит/с,}$$

$$B_{16-КАМ} = 4 \cdot 48 \cdot \frac{1}{(T_s + T_p)} = 48 \text{ Мбит/с.}$$

В зависимости от помеховой ситуации в стандарте предусмотрено использование адаптивных схем модуляции и кодирования. Основные характеристики стандарта приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Скорость передачи данных Мбит/с	Модуляция	Кодовая скорость	Число символов на поднесущую	Число символов в OFDM символе	Число бит в OFDM символе
6	2-ФМ	1/2	1	48	24
9	2-ФМ	3/4	1	48	36
12	4-ФМ	1/2	2	96	48
18	4-ФМ	3/4	2	96	72
24	16-КАМ	1/2	4	192	96
36	16-КАМ	3/4	4	192	144
48	64-КАМ	2/3	6	288	192
54	64-КАМ	3/4	6	288	216

Доступ к сети абонентских станций и возможность передачи кадров в сетях 802.11 осуществляют с помощью координатных функций. При использовании **распределенной координатной функции** DCF (distributed coordination function) все станции имеют одинаковый приоритет и занимают

канал на основе состязаний с таймерами отката. Принцип действия DCF поясняет рис. 3.14.

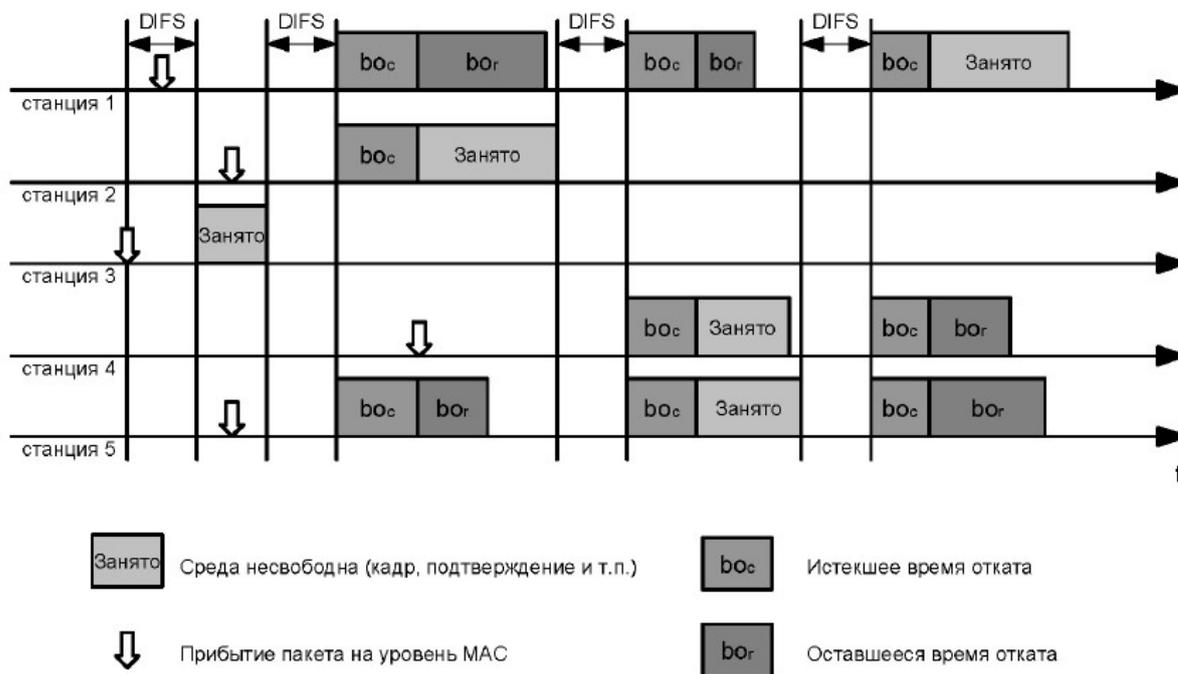


Рис. 3.14. Работа станций в режиме DCF

Работающие станции прослушивают радиоканал и ждут, пока он не станет свободным (прекратится передача несущей). На рис. 3.11 вначале передает станция 3, а к передаче готовы станции 1, 2 и 5. По завершении кадра станции 3 следует обязательный межкадровый промежуток DIFS (34...50 мкс), после чего станции, готовые передать свои пакеты, начинают состязание. Каждая из станций запускает таймер состязаний, где устанавливаются случайные числа внутри окна состязаний: 0...7, 0... 15, и далее до 31, 63, 127, 256. С момента начала состязания начинается считывание таймеров с тактовой скоростью 9...20 мкс. Та станция, которая первой обнулит таймер, занимает канал (станция 2). Остальные запоминают содержимое своих таймеров (откат) до следующего состязания. В процессе передачи возможны коллизии, когда две станции одновременно обнулят свои таймеры (станции 4 и 5). Это приводит к расширению окна состязаний с последующим повтором передачи кадров.

В реальном алгоритме доступа на основе DCF используют более надежную процедуру (рис. 3.15). Станция, выигравшая состязание, посылает короткий пакет запроса получателю RTS – *Request to Send*, на что получает подтверждение готовности получателя к приему CTS – *Clear to Send*. После этого следует передача информационного кадра. Цикл завершает пакет подтверждения (или неподтверждения) приема кадра ACK.

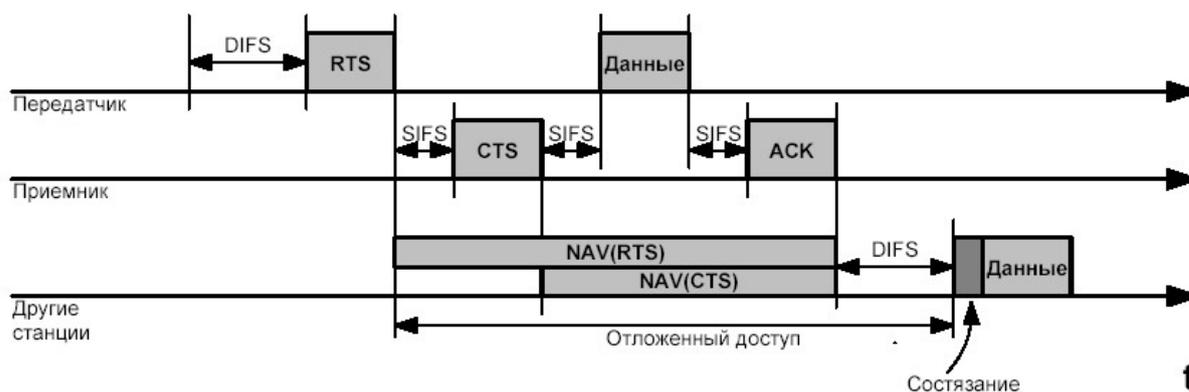


Рис. 3.15. Процедура доступа к сети на основе DCF

В цикле передачи кадры RTS – CTS – Данные – ACK разделяют короткими межкадровыми промежутками SIFS (10...16 мкс). Станции, не участвующие в обмене, по информации, содержащейся в кадрах RTS и CTS о длительности цикла передачи, устанавливают у себя векторы NAV (network allocation vector). NAV – это время считывания таймера, в течение которого станция находится в “спящем” режиме и не участвует в состязании, пока NAV не станет равным 0.

Рассмотренный метод доступа используют при чтении файлов из Интернета. Однако он не позволяет передавать потоковое видео и, тем более, IP-телефонию, где жестко лимитированы допустимые задержки сигналов. Стандарт IEEE 802.11e предусматривает поддержку в Wi-Fi сетях четырех классов трафика, расставленных в порядке приоритетов:

Voice – телефонию с качеством передачи на уровне междугородной связи,

Video – передачу телевидения,

Best Effort – чтение Интернет-файлов,

Background – передачу файлов с низким приоритетом.

Реализация стандарта 802.11e возможна только в сетях с точками доступа, где для занятия канала используют **точечную координатную функцию** PCF (point coordination function). Принцип работы сети на основе PCF поясняет рис. 3.16.

Процесс передачи определяет точка доступа AP. Время передачи поделено на суперкадры, длительность которых AP устанавливает адаптивно и в процессе передачи может менять. В начале каждого суперкадра AP передает кадр маяка. Он устанавливает длительность суперкадра, максимальный размер информационных кадров и период, свободный от состязаний. В это время обмен информацией между точкой доступа и станциями идет только по опросу AP (сама станция занять канал не может). Одновременно с посылкой кадра опроса (polling) AP может отправить на станцию и информационный кадр. Окончание периода без состязаний AP маркирует посылкой кадра CF-End. После этого станции, включая AP, занимают канал на основе состязаний. Такой метод доступа позволяет

организовать передачу пакетов данных с постоянной скоростью, что необходимо при телефонном и потоковом трафике.

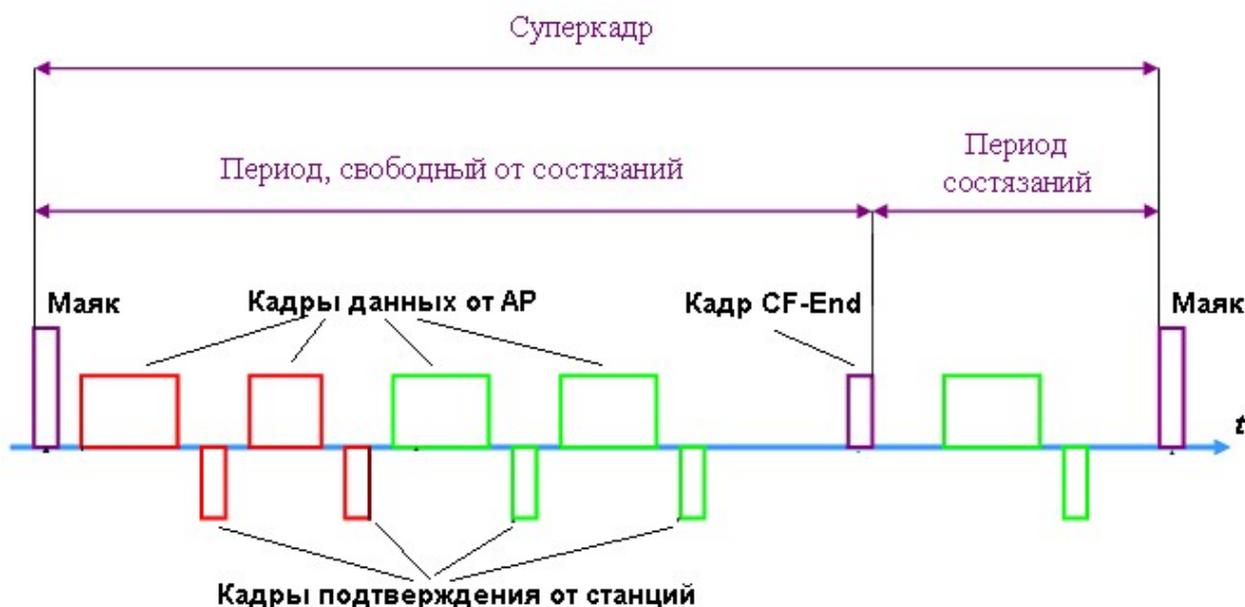


Рис. 3.16. Передача данных на основе PCF

В стандарте 802.11n введен ряд принципиальных новшеств, направленных на повышение скорости передачи данных в сетях Wi-Fi.

1. Возможность использовать каналы как с полосой 20 МГц, так и с удвоенной полосой 40 МГц.

2. Опциональная возможность работать в условиях малых запаздываний отраженных волн (в зданиях) с уменьшенной величиной защитного интервала ( $T_g = 0,4$  мкс вместо 0,8 мкс).

3. Использование пространственного мультиплексирования для увеличения скорости передачи данных в радиоканале.

4. Увеличение объема информационной части фрейма за счет агрегации MAC-фреймов, что повышает эффективность использования канального ресурса.

Рассмотрим наиболее важные детали введенных в стандарт 802.11n технологий. В сетях 802.11n в полосе 20 МГц число информационных поднесущих, передающих трафик, увеличено с 48 до 52 при 4 пилотных поднесущих, что приводит к возрастанию символьной скорости с 12 до 13 Мсимв/с. При использовании технологии объединения частотных полос (channel bonding) в полосе 40 МГц размещено 108 информационных поднесущих и 6 пилотных, что обеспечивает символьную скорость 27 Мсимв/с.

Работа с уменьшенной величиной защитного интервала (0,4 мкс) приводит к увеличению символьной скорости до 14,4 Мсимв/с в полосе 20 МГц и 30 Мсимв/с в полосе 40 МГц.

Пространственное мультиплексирование является одной из технологий многоантенной передачи.

В сетях 802.11n возможна передача 2, 3 и 4 независимых потоков данных в радиоканале от точки доступа к абонентским станциям при соответствующем числе антенн на передающей и приемной сторонах. Пропускная способность радио тракта при этом возрастает пропорционально числу потоков данных. Скорости передачи данных в сетях 802.11n в зависимости от используемых модуляционно-кодирующих схем (MCS) и технологий передачи может составлять от 6.5 до 600 Мбит/с.

Стандарт 802.11ac представляет собой дальнейшее развитие технологий, введенных в стандарт 802.11n. В спецификациях устройства стандарта 802.11ac отнесены к классу VHT (Very High Throughput) – с очень высокой пропускной способностью. Сети стандарта 802.11ac работают только в диапазоне 5 ГГц. Полоса радиоканала может составлять 20, 40, 80 и 160 МГц. Возможна также агрегация двух радиоканалов 80+80 МГц.

Для повышения скорости передачи введена модуляция 256-QAM. Число каналов при пространственном мультиплексировании может достигать 8 (работа с 8 передающими и приемными антеннами). Кроме однопользовательского MIMO возможна реализация многопользовательского MIMO, когда одновременно в радиоканале идет передача трафика разным абонентским станциям. Скорости передачи данных в сетях 802.11ac для 10 специфицированных модуляционно-кодирующих схем (MCS) и радиоканалов разной ширины могут достигать 866,7 Мбит/с, а при 8 потоках пространственного уплотнения – 6933,3 Мбит/с.

Освоение стандарта 802.11ac и производство аппаратуры идет “волнами”. Аппаратуру 802.11ac первой волны (Wave 1) выпускают с 2013г. Эта аппаратура поддерживает передачу в радиоканалах с полосой 20, 40 и 80 МГц и однопользовательское SU-MIMO (Single User) с 3 независимыми потоками в радиоканале, что при модуляции 256-QAM обеспечивает скорость при передаче 1,3 Гбит/с. Аппаратура волны 2 (Wave 2), выпуск которой начался с 2016г., позволяет расширить полосу радиоканала до 160 МГц и реализовать многопользовательское MU-MIMO (Multi User) с увеличением числа независимых потоков в радиоканале до 4. В результате пиковые скорости передачи достигнут величин 2,34 – 3,47 Гбит/с, а реальные скорости сброса информации на смартфоны 560 Мбит/с, планшеты – 1,1 Гбит/с и ноутбуки – 1,6 Гбит/с.

### **3.4. СЕТИ СТАНДАРТОВ WiMAX**

Некоммерческая организация WiMAX (World Interoperability for Microwave Access - взаимодействие оборудования сетевого доступа на сверхвысоких частотах во всем мире) была образована с целью содействия разработке беспроводного оборудования доступа к широкополосным сетям на основе спецификации IEEE 802.16 для беспроводных зональных сетей, сертификации такого оборудования на совместимость и взаимодействие, а также ускорению его выхода на рынок.

В стандарте 802.16 предусмотрена работа в диапазонах 2...11 ГГц и 10-66 ГГц (рис.3.17). В диапазоне 10-66 ГГц радиосвязь возможна лишь в

случае прямой видимости между точками. В этом диапазоне используют прямую модуляцию несущей (режим с одной несущей).



Рис. 3.17. Классификация радиоканалов

В диапазоне 2...11 ГГц спецификации радиointерфейса, допускают возможность решения задачи радиосвязи в условиях многолучевого распространения и при отсутствии прямой видимости (NLOS - Non-Line-Of-Sight). Радиointерфейс WMAN-SC2 использует модуляцию одной несущей, радиointерфейс WMAN – OFDM – ортогональную частотную модуляцию (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) с быстрым преобразованием Фурье на 256 точек и до 2048 точек.

В стандарте 802.16 используют следующие интерфейсы:

1. WirelessMAN-SC (10 – 66 ГГц)
2. WirelessMAN-SCa (2 – 11 ГГц; лицензионные диапазоны)
3. WirelessMAN-OFDM (2 – 11 ГГц; лицензионные диапазоны)
4. WirelessMAN-OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access (2 – 11 ГГц; лицензионные диапазоны)
5. WirelessHUMAN (2 – 11 ГГц; нелицензионные диапазоны)

Интерфейсы 3 и 5 предусматривают возможности Mesh – организацию сетей с полносвязной топологией для ускорения передачи трафика.

В частотной области сигнал характеризуют спектральные характеристики (рис. 3.18). В нем присутствуют поднесущие для передачи данных, пилотных сигналов, а по краям полосы расположены защитные интервалы.

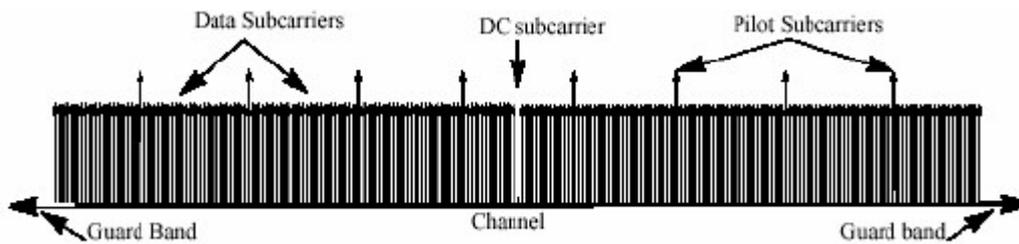


Рис. 3.18. Описание сигнала в частотной области

Символ OFDM характеризуют следующие параметры:

- $BW$  – номинальная ширина полосы канала.
- $N_{used}$  - число используемых поднесущих.
- $n$  - коэффициент выборки. Этот параметр, в соединении с  $BW$  и  $N_{used}$  определяет разнесение поднесущей и длительность символа. Требуемые значения этого параметра определены в табл.4.4.
- $G$  - отношение длительности защитного интервала (префикса) к полезному времени. Эта величина может составлять  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$  Тб.
- $N_{FFT}$ : число точек преобразования Фурье,
- Частота следования посылок:  $F_s = \text{floor}(n * BW / 0.008) * 0.008$  ( $BW$ - ширина полосы в МГц),
- $\Delta f$ : разнесение поднесущей, определенное как:  $F_s / N_{FFT}$ ,
- $T_b = 1 / \Delta f$  – длительность преобразования символа,
- $T_g = G * T_b$  – длительность защитного интервала (CP),
- $T_s = T_b + T_g$  – длительность символа OFDM,
- $T_g / N_{FFT}$  - интервал дискретизации.

Основные параметры OFDM каналов стандарта 802.11а приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5.

Parameter	Value
$N_{FFT}$	256
$N_{used}$	200
$n$	licensed channel bandwidths which are multiples of 1.75 MHz licensed channel bandwidths which are multiples of 2.75 MHz, and license-exempt: 8/7 any other bandwidth: 7/6
$G$	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Number of lower frequency guard subcarriers	28
Number of higher frequency guard subcarriers	27
Frequency offset indices of guard subcarriers	-128,-127,...,-101 +101,+102,...,127
Frequency offset indices of pilot carriers	88,-63,-38,-13,13,38,63,88
Subchannel Index:	Allocated Frequency offset indices of subcarriers:
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <math>0b10000:</math> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left\{ \begin{array}{l} 0b01000: \\ 0b11000: \end{array} \right.</math> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left\{ \begin{array}{l} 0b00100: \\ 0b01100: \\ 0b10100: \\ 0b11100: \end{array} \right.</math> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left\{ \begin{array}{l} 0b00010: \\ 0b00011: \\ 0b00101: \\ 0b00110: \\ 0b00111: \\ 0b01001: \\ 0b01010: \\ 0b01011: \\ 0b01101: \\ 0b01110: \\ 0b10001: \\ 0b10010: \\ 0b10011: \\ 0b10101: \\ 0b10110: \\ 0b10111: \\ 0b11001: \\ 0b11010: \\ 0b11011: \\ 0b11101: \\ 0b11110: \\ 0b11111: \end{array} \right.</math> </div> <div> <math>\left\{ \begin{array}{l} 0b00001: \\ 0b00011: \\ 0b00101: \\ 0b00111: \\ 0b01001: \\ 0b01011: \\ 0b01101: \\ 0b01111: \\ 0b10001: \\ 0b10011: \\ 0b10101: \\ 0b10111: \\ 0b11001: \\ 0b11011: \\ 0b11101: \\ 0b11111: \end{array} \right.</math> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <math>\left\{ \begin{array}{l} 0b00001: \\ 0b00011: \\ 0b00101: \\ 0b00111: \\ 0b01001: \\ 0b01011: \\ 0b01101: \\ 0b01111: \\ 0b10001: \\ 0b10011: \\ 0b10101: \\ 0b10111: \\ 0b11001: \\ 0b11011: \\ 0b11101: \\ 0b11111: \end{array} \right.</math> </div> <div> <math>\left\{ \begin{array}{l} \{-100:-98, -37:-35, 1:3, 64:66\} \\ \{-38\} \\ \{-97:-95, -34:-32, 4:6, 67:69\} \\ \{-94:-92, -31:-29, 7:9, 70:72\} \\ \{13\} \\ \{-91:-89, -28:-26, 10:12, 73:75\} \\ \{-87:-85, -50:-48, 14:16, 51:53\} \\ \{-88\} \\ \{-84:-82, -47:-45, 17:19, 54:56\} \\ \{-81:-79, -44:-42, 20:22, 57:59\} \\ \{63\} \\ \{-78:-76, -41:-39, 23:25, 60:62\} \\ \{-75:-73, -12:-10, 26:28, 89:91\} \\ \{-13\} \\ \{-72:-70, -9:-7, 29:31, 92:94\} \\ \{-69:-67, -6:-4, 32:34, 95:97\} \\ \{38\} \\ \{-66:-64, -3:-1, 35:37, 98:100\} \\ \{-62:-60, -25:-23, 39:41, 76:78\} \\ \{-63\} \\ \{-59:-57, -22:-20, 42:44, 79:81\} \\ \{-56:-54, -19:-17, 45:47, 82:84\} \\ \{88\} \\ \{-53:-51, -16:-14, 48:50, 85:87\} \end{array} \right.</math> </div> </div> <p>Note that pilot subcarriers are allocated only if two or more subchannels are allocated.</p>

Длительность символов в зависимости от ширины полосы канала приведена в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Полоса, МГц	1,75	3,5	7	3	5,5	10
T <sub>b</sub> , мкс	128	64	32	≈73,2	≈40,8	≈22,4

Схемы модуляции и кодирования сведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Coded block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

Величины скоростей передачи в зависимости от вида модуляции и кодовой скорости приведены в табл. 3.8, а требования к отношению сигнал/шум на входе приемника для различных схем модуляции и кодирования в табл. 3.9.

Таблица 3.8

Полоса МГц	Скорость передачи Мбит/с					
	QPSK, 1/2	QPSK, 3/4	16-QAM, 1/2	16-QAM, 3/4	64-QAM, 2/3	64-QAM, 3/4
1,75	1,04	2,18	2,91	4,36	5,94	6,55
3,5	2,08	4,37	5,82	8,73	11,88	13,09
7,0	4,15	8,73	11,64	17,45	23,75	26,18
10,0	8,31	12,47	16,63	24,94	33,25	37,4
20,0	16,62	24,94	33,25	49,87	66,49	74,81

Таблица 3.9.

Модуляция	Скорость кодирования	SNR, дБ
QPSK	1/2	9,4
	3/4	11,2

16-QAM	1/2	16,4
	3/4	18,2
64-QAM	2/3	22,7
	3/4	24,4

Данные на физическом уровне передают в виде непрерывной последовательности кадров. Каждый кадр имеет фиксированную длительность (2 (2,5) ... 20 мс), поэтому его информационная емкость зависит от символьной скорости и метода модуляции. Кадр состоит из преамбулы (синхропоследовательности длиной 32 QPSK - символа), управляющей секции и последовательности пакетов с данными. Сети IEEE 802.16 дуплексные. Возможно как частотное FDD, так и временное TDD разделение восходящего и нисходящего каналов.

При временном дуплексировании каналов кадр делят на нисходящий и восходящий субкадры (их соотношение может гибко менять в процессе работы в зависимости от потребностей полосы пропускания для восходящих и нисходящих каналов), разделенные специальным защитным интервалом  $T_3$ . При частотном дуплексировании восходящий и нисходящий каналы передают на двух несущих (рис. 3.19)



Рис. 3.19. Структура кадров для TDD и FDD

В нисходящем канале информацию от базовой станции передают в виде последовательности пакетов. Для каждого пакета можно задавать метод модуляции и схему кодирования данных – т.е. выбирать между скоростью и надежностью передачи. TDM – пакеты передают одновременно для всех абонентских станций, каждая из них принимает весь информационный поток и выбирает «свои» пакеты. Чтобы абонентские станции могли отличить один пакет от другого, в управляющей секции передают карты нисходящего (DL-MAP), и восходящего (UL-MAP) каналов (рис. 3.20).



Рис. 3.20. Структура нисходящего канала.

В карте нисходящего канала указана длительность кадра, номер кадра, число пакетов в нисходящем субкадре, а также точка начала и тип профиля каждого пакета. Точку начала отсчитывают в так называемых физических слотах, каждый физический слот равен четырем модуляционным символам.

Профиль пакета – это список его параметров, включая метод модуляции, тип FEC – кодирования (с параметрами схем кодирования), а также диапазон значений отношения сигнал/шум в приемном канале конкретной станции, при котором данный профиль можно применять. Базовая станция периодически транслирует список профилей в виде специальных управляющих сообщений (дескрипторов нисходящего и восходящего каналов DCD/UCD), причем каждому профилю присваивают номер, который и используют в карте нисходящего канала.

Абонентские станции получают доступ к среде передачи посредством механизма временного разделения каналов TDMA (Time Division Multiple Access). Для этого в восходящем субкадре для АС базовая станция резервирует специальные временные интервалы – слоты (рис. 3.21). Информация о распределении слотов между АС записана в карте восходящего канала UL-MAP, транслируемой в каждом кадре. UL-MAP – функционально аналогична DL-MAP – в ней сообщают, сколько слотов в субкадре, точку начала и идентификатор соединения для каждого из них, а также типы профилей всех пакетов. Сообщение UL-MAP текущего кадра может относиться как к данному кадру, так и к последующему. Скорость модуляции (частота символов) в восходящем канале должна быть такой же, как и в нисходящем. Отметим, что, в отличие от нисходящих TDM – пакетов, каждый пакет в восходящем канале начинается с преамбулы – синхропоследовательности длиной 16 или 32 QPSK - символа.

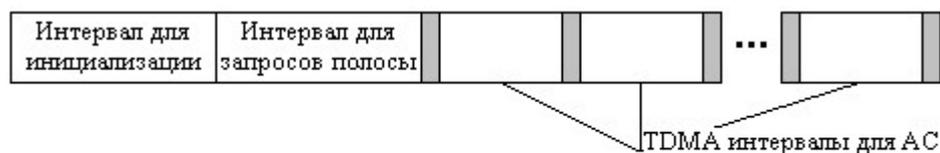


Рис. 3.21. Структура восходящего канала

В восходящем канале, кроме назначенных БС слотов для определенных АС, предусмотрены интервалы, в течение которых АС может передать

сообщение для первичной регистрации в сети или для запроса изменения полосы пропускания канала (предоставление каналов по требованию DAMA - Demand Assigned Multiple Access). Поскольку эти сообщения спонтанны, в данных интервалах возможны коллизии, вызванные одновременной работой передатчиков двух и более АС. Принцип работы с коллизиями аналогичен используемому в стандарте 802.11. После того, как АС решила, что ей нужно зарегистрироваться (запросить) канал, она не начинает трансляцию в первом же предназначенном для этого интервале, а использует генератор случайных чисел (ГСЧ), выбирающий значения из некоторого диапазона от 0 до  $2^n - 1$ . Так, если  $n=4$ , ГСЧ выбирает число в диапазоне от 0-15, например 11. Далее АС отсчитывает 11 интервалов, предназначенных для регистрации/запроса канала и только в 12-м выходит в эфир. Если передача прошла успешно и БС приняла запрос, она в определенный период ответит специальным сообщением. В противном случае АС считает попытку неудачной и повторяет процедуру.

Важная особенность стандарта IEEE 802.16 – система контроля радиоканала, благодаря которой базовая станция способна контролировать синхронность, несущую частоту и мощность каждой АС и при необходимости изменять/корректировать эти параметры посредством служебных сообщений.

Физический уровень стандарта IEEE 802.16 обеспечивает непосредственную доставку потоков данных между БС и АС. Все задачи, связанные с формированием структур этих данных, а также управлением работой системы решаются на МАС (Medium Access Control) уровне. Оборудование стандарта IEEE 802.16 формирует транспортную среду для различных приложений (сервисов).

Первая задача, решаемая в IEEE 802.16, – это механизм поддержки разнообразных сервисов верхнего уровня. Разработчики стандарта стремились создать единый для всех приложений протокол МАС-уровня, независимо от особенностей физического канала. Это существенно упрощает связь терминалов конечных пользователей с городской сетью передачи данных.

Физически среды передачи в разных фрагментах WMAN могут быть различны, но структура данных одинакова. В одном канале могут работать (не одновременно) сотни различных терминалов большего числа конечных пользователей. Этим пользователям необходимы самые разные сервисы (приложения) – передача голоса и данных с временным разделением, соединения по протоколу IP, пакетная передача речи через IP (VoIP) и т.п. Качество услуг (QoS) каждого отдельного сервиса не должно изменяться при работе через сети IEEE 802.16. Алгоритмы и механизмы доступа МАС-уровня должны решать все эти задачи.

Структурно МАС-уровень IEEE 802.16 разделен на три подуровня (рис. 3.22):

- подуровень преобразования сервиса CS (Convergence Sublayer);
- основной подуровень CPS (Common Part Sublayer);

-подуровень защиты PS (Privacy Sublayer).

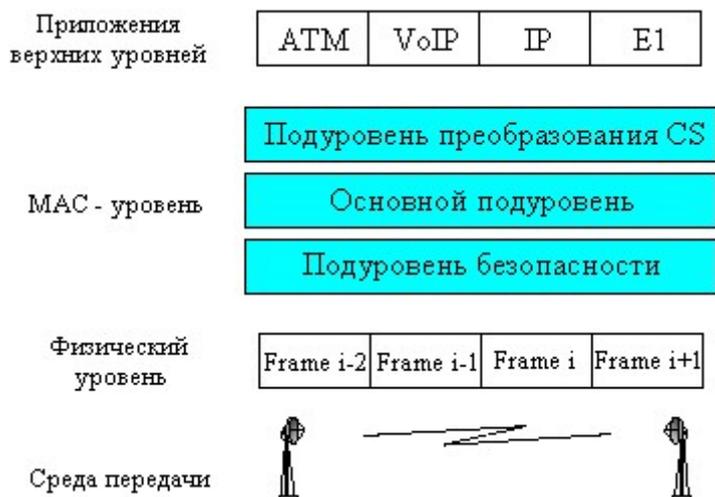


Рис. 3.22.

На подуровне защиты реализуют функции, обеспечивающие криптозащиту данных и механизмы аутентификации/предотвращения несанкционированного доступа. Для этого предусмотрены наборы алгоритмов криптозащиты и протокол управления ключом шифрования. Ключ каждой АС базовая станция может передавать в процессе авторизации, используя схему работы «клиент (АС) – сервер (БС)».

На подуровне преобразования сервиса происходит трансформация потоков данных протоколов верхних уровней для передачи через сети IEEE 802.16. Для каждого типа приложений верхних уровней стандарт предусматривает свой механизм преобразования. Спецификации стандарта IEEE 802.16 содержат механизмы работы в режиме ATM и пакетной передачи. Под пакетной передачей подразумевают достаточно широкий набор различных пакетов типа IP, PPP и IEEE Std 802.3 (Ethernet). Цель работы на CS-подуровне – оптимизация передаваемых потоков данных каждого приложения верхнего уровня с учетом их специфики. Механизм обеспечения QoS состоит в присоединении на уровне конвергенции в MAC заголовков сведений о типе передаваемого потока. Для этого используют либо 32 –битовый идентификатор потока услуг SFID (Service Flow ID) либо непосредственно CID – Connection ID. При назначении SFID устанавливают значения параметров QoS, индивидуально в направлениях вверх и вниз. Эти параметры могут быть совершенно разными, например, при однонаправленной передаче видотрафика.

Работу по выделению канального ресурса с учетом обеспечения QoS выполняет планировщик (scheduler). Это ПО в базовой станции, поставляемое производителем аппаратуры. При организации передачи вниз (БС→АС) планировщик всегда имеет полную информацию о всех обслуживаемых потоках данных и может оптимизировать распределение канального ресурса. При организации передач вверх (АС→БС) специфицировано 5 типов трафика в зависимости от их приоритета и требованиям к задержкам. В трех из них предусмотрен опрос (polling) АС с

тем, чтобы оперативно изменять выделяемой конкретной АС каналный ресурс:

UGS – Unsolicited Grant Service: передача в реальном времени сигналов и потоков телефонии (E1) и VoIP; допустимая задержка менее 5 – 10 мс в одном направлении при BER =  $10^{-6}$ ...  $10^{-4}$ ,

ertPS – extended real time Polling Service, предназначена для передачи вверх телефонии с использованием детектора речевой активности абонента,

rtPS – real time Polling Service: передача потоков реального времени с пакетами переменной длины (например, видео),

nrtPS – non-real-time Polling Service: поддержка потоков переменной длины при передаче файлов в широкополосном режиме,

BE – Best Effort: остальной трафик.

Сформированные пакеты данных MAC PDU (MAC Protocol Data Unit, блоки данных MAC-уровня) далее передают на физический уровень и транслируют через канал связи. Пакет MAC PDU включает заголовок и поле данных (его может и не быть), за которым может следовать контрольная сумма CRC.

Технологии, используемые в стандарте 802.16, требуют соответствующего управления радиоканалом, особенно управления характеристиками физического уровня передачи в зависимости от индивидуальных особенностей канала конкретного абонента и его потребностей в пропускной способности. Уровень управления радиоканалом RLC (Radio Link Control) обеспечивает эти возможности так же, как и традиционные функции управления мощностью излучения.

Управляющие сообщения – это основной механизм управления системой IEEE 802.16. Описание профилей пакетов, управление доступом, механизмы криптозащиты, динамическое изменение работы системы и т.д. – все функции управления, запроса и подтверждения реализуются через управляющие сообщения. Рассмотренные выше карты входящего/нисходящего каналов (UL/DL-MAP) также являются управляющими сообщениями. Формат управляющих сообщений прост – поле типа сообщения (1 байт) и поле данных (параметров).

Стандарт IEEE 802.16 предусматривает два режима предоставления доступа для АС – для каждого отдельного соединения GPC (Grants per connection) и для всех соединений определенной АС GPSS (Grants per subscriber station). Режим GPSS обязателен для всех устройств в диапазоне 10–66 ГГц. Очевидно, что первый механизм обеспечивает большую гибкость, однако второй существенно сокращает объем служебных сообщений и требует меньшей производительности от аппаратуры.

Запросы полосы могут быть как спорадическими для БС, так и планируемыми. В первом случае запросы реализуют посредством пакетов, состоящих из заголовка запроса, передаваемых на конкурентной основе в специально выделенном для них интервале восходящего канала. Процедура плановых запросов полосы в восходящем канале называется опросом (polling) – БС как бы опрашивает АС об их потребностях. Реально это

означает, что базовая станция предоставляет конкретной АС интервал для передачи запроса о предоставлении/изменении полосы, т.е. никакой конкуренции уже нет.

Опрос может быть в «реальном времени» – интервалы для запроса предоставляют АС с тем же периодом, с каким у нее может возникнуть потребность в изменении условий доступа (например, в каждом кадре). Другой вариант опроса – вне «реального времени». В этом случае БС предоставляет АС интервал для запроса также периодически, но период этот существенно больше.

Для приложений, у которых периодичность и размер пакетов фиксированы (например, в телефонии по E1), предусмотрен механизм доступа к каналу без требования UGS (Unsolicited Grant Service). В этом случае БС с заданным периодом предоставляет АС для передачи данных интервалы фиксированного размера, соответствующие скорости потока данных. Если в ходе работы АС нужно изменить условия доступа, она делает это посредством специального MAC - подзаголовка управления предоставлением канала. В этом подзаголовке есть флаг «опроси меня», установив который, АС запрашивает у БС интервал для новой полосы. Существенно, что в упомянутом подзаголовке есть специальный бит индикации переполнения выходного буфера передатчика АС, что приводит к потере данных (slip). БС может отреагировать на появление этого сигнала, например, увеличив полосу для данной АС.

Системная конфигурация состоит из пяти компонентов: конфигурация MAC, конфигурация PHY, конфигурация RF, выбор дуплексной работы и класс мощности. Управление параметрами конфигураций производится программно – благодаря реализованному в системе WiMAX технологии SDR – soft-defined radio (программно-определяемого радио).

В основе стандарта мобильного WiMAX IEEE802.16e лежит технология SOFDMA – Scalable OFDM Access), что предоставляет возможность выделять отдельным базовым и абонентским станциям не весь, а часть канального ресурса в соответствующей полосе рабочих частот. Кроме того, полный канальный ресурс (множество поднесущих частот) может быть разделен между несколькими соседними базовыми станциями, что позволяет организовывать хэндовер при перемещении абонентов от одной базовой станции к другой. По этой причине стандарт 802.16e часто называют мобильным WiMAX.

Второе отличие стандарта 802.16e состоит в том, что число поднесущих меняется с изменением рабочей полосы. Это позволяет сохранить постоянным разнос частот между поднесущими и активную длину символа T<sub>b</sub>. Согласно спецификациям в 802.16e определены полосы в 1,25; 5; 10 и 20 МГц (табл.3.10).

Таблица 3.10

Параметр	Характеристики OFDM			
Номинальная полоса частотного канала, МГц	1,25	5	10	20

Число поднесущих	128	512	1024	2048
Отношение $T_g/T_b$	1/32, 1/16, 1/8, 1/4			
Разнос поднесущих, кГц	10,94	10,94	10,94	10,94
Активная длина символа, мкс	91,4	91,4	91,4	91,4
Защитный промежуток, мкс, при $T_g/T_b = 1/8$	11,4	11,4	11,4	11,4
Длина OFDM символа $T_s = T_b + T_g$ , мкс	102,9	102,9	102,9	102,9

Принципиальным отличием стандарта 802.16e является выделение канального ресурса в частотной области в виде подканалов. Стандартом предусмотрены различные варианты распределения канального ресурса. Наиболее часто используют режим PUSC (Partial Usage of Subcarriers). Этот режим является обязательным в начале каждого подкадра передачи вниз. Распределение поднесущих в режиме PUSC поясняет табл.11.6. Защитные поднесущие по краям полосы и центральную поднесущую для передачи информации не используют. Оставшиеся поднесущие делят на минимальные канальные единицы, называемые кластерами.

Каждый кластер образуют 14 расположенных рядом поднесущих. Формально один кластер всегда составлен из 2 последовательных OFDM символов, т.е. из 28 поднесущих, где на 24-х передают данные, а на 4-х – пилотные сигналы (рис.3.23).

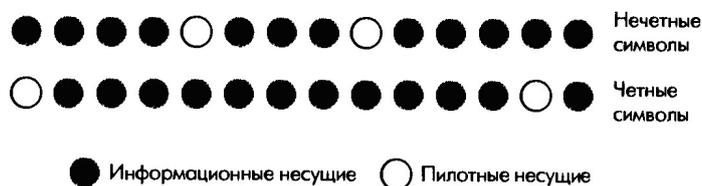


Рис. 3.23.

В WiMAX версии IEEE 802.16e используют следующие технологии:

- - разнесенный прием (одна передающая антенна и несколько приемных);
- - пространственно-временное/частотное кодирование (несколько передающих антенн и одна или несколько приемных);
- - пространственное мультиплексирование (несколько передающих и несколько приемных антенн),
- - направленное излучение (beamforming).

Первая из указанных технологий широко применяется для каналов с замираниями и описана в Разделе 2, поэтому на ней останавливаться здесь не будем. Цель пространственно-временного кодирования (STC – Space Time Coding) состоит в улучшении отношения сигнал/помеха при приеме и следовательно в улучшении качества связи. В варианте с двумя передающими антеннами через них передают комбинации каждых двух

последовательных символов. Которые позволяют распознать их на приемной стороне с минимальной вероятностью ошибки. Прием сигналов при STC можно осуществлять как на одну, так и на 2 антенны. При пространственном мультиплексировании одновременно через разные антенны передают независимые потоки данных. В этом случае число приемных антенн должно быть не меньше числа передаваемых потоков. Это обеспечивает увеличение пропускной способности в канале связи. Технология beamforming служит формированию оптимальных диаграмм направленности в многоантенных системах. Направленность получается с помощью комбинации методов разнесенной передачи и разнесенного приема. Технология по реализации близка к технологии пространственного мультиплексирования с обратной связью. Целью является получение максимального отношения сигнал/помеха в приемнике. Идея состоит в том, чтобы при передаче распределить мощности излучения между передающими антеннами в соответствии с отношениями сигнал/помеха в разных приемниках.

Указанные технологии являются опциональными и на практике наиболее широко применяется пространственное мультиплексирование в MIMO (multiple input – multiple output) структурах. В структуре MIMO на передающей стороне имеется  $N_t$  передающих антенн, а на приемной стороне  $N_r$  приемных. Эту структуру поясняет рис.3.24.

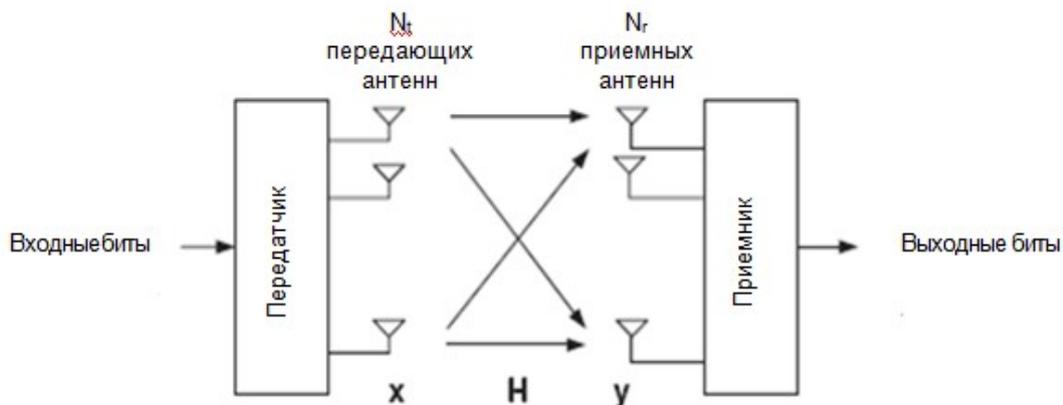


Рис.3.24. MIMO структура

Математическая модель, описывающая систему (рис. 3.24), представляет собой векторное уравнение

$$y = H \times x + n \quad (3.4)$$

где  $n$  – вектор помех на входе приемников. Коэффициенты передач в каналах между различными передающими и приемными антеннами определяет матрица  $H$ :

$$\begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \dots & h_{N_r,N_t} \end{pmatrix}$$

где коэффициенты  $h_{ij}$  являются комплексными переменными величинами и должны быть разными. Основная сложность в реализации подобных систем состоит в выборе оптимального алгоритма приема. Задача состоит в решении уравнения (3.4) относительно вектора передаваемых сигналов  $X$ . Такое решение математически существует, если коэффициенты передачи  $h_{ij}$  не коррелированы, для чего трассы распространения должны быть независимыми. Это достигается пространственным разнесением приемных и передающих антенн на соответствующие расстояния.

Хэндовер в сетях мобильного WiMAX – это процесс, при котором абонентская станция (АС) перемещается из радиointерфейса, предоставляемого одной базовой станцией (БС), в радиointерфейс, предоставляемый другой БС.

Существуют 2 вида хэндовера:

- хэндовер с переключением с разрывом до включения: хэндовер, при котором целевая БС начинает обслуживание после разрыва связи с предыдущей обслуживающей БС;

- хэндовер с переключением с разрывом после включения: хэндовер, при котором целевая БС начинает обслуживание до разрыва связи с предыдущей обслуживающей БС.

В сетях WiMAX можно выделить два типа хэндоверов:

- внутрисетевой или горизонтальный;
- межсетевой или вертикальный.

Причинами хэндоверов в сетях WiMAX, как и в других сетях радиодоступа, могут явиться:

- снижение уровня сигнала вверх или вниз;
- увеличение уровня помех вверх или вниз;
- бюджет мощности;
- возможность обслуживания на БС с лучшими показателями QoS;
- возможность обслуживания в сетях других стандартов с лучшими показателями QoS.

На рис. 3.25 приведен пример, где две БС подключены к магистрали оператора. БС1 – обслуживающая БС для АС. БС2 – соседняя БС. Если АС приближается к БС2, как это показано стрелкой, то БС2 может стать целевой БС для передачи обслуживания.

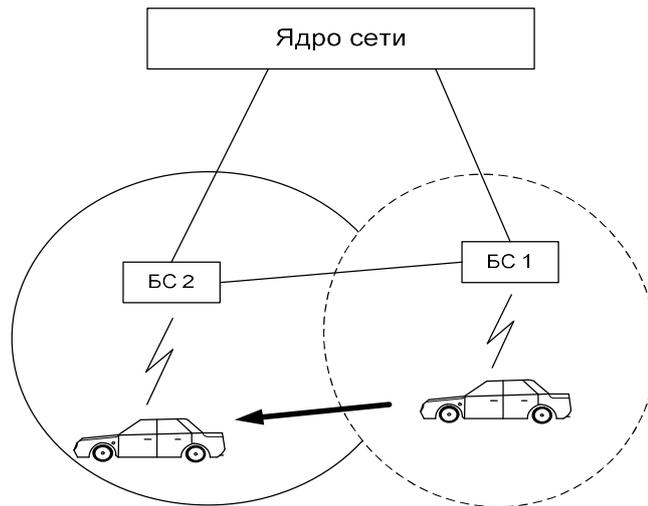


Рис. 3.25. Пример сетевой модели передачи обслуживания

Для того, чтобы знать об изменениях динамично меняющейся радиочастотной среды, базовая станция выделяет время для каждой абонентской станции для проведения мониторинга и измерения состояния радиоканала с соседними базовыми станциями. Этот процесс называют сканированием (scanning), а время, выделенное для каждой АС, называют интервалом сканирования (scanning interval). Каждый интервал сканирования следует за интервалом обычного действия (normal operation), который относится к интервалу чередования (interleaving interval). Для того, чтобы начать процесс сканирования, БС создает сообщение MOB\_SCN-REQ, которое точно определяет для мобильной станции длину каждого интервала сканирования (scanning interval), длину интервала чередования (interleaving interval), и число сканирований (scanning event), которое требуется выполнить мобильной станции. Для того, чтобы уменьшить число передач таких сообщений, как MOB\_SCN-REQ и MOB\_SCN-RES (ответ от мобильной станции после того, как ей было отправлено сообщение MOB\_SCN-REQ), которые передают по радиоканалу, БС может предписать АС выполнить множественное сканирование (multiply scanning event). Идентификаторы соседних базовых станций и частоты, которые необходимо просканировать мобильной станции, передают в сообщении MOB\_NBR-ADV.

В течение интервала сканирования АС измеряет уровень принятого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) и отношение сигнал/помеха SINR (signal-to-interference-plus noise ratio) соседних базовых станций. В течение этого интервала АС может дополнительно соединиться (associate) с некоторыми или со всеми БС из списка соседних базовых станций, что требует от АС выполнения процедуры доступа к БС (ranging). Во время процедуры доступа базовая станция обрабатывает сигнал от АС, оценивая различные параметры радиоканала, такие как импульсную характеристику канала, отношение сигнал/шум и время прихода пакетов. После этого БС

передает АС информацию о необходимой регулировке мощности и времени упреждения.

В стандарте WiMAX процесс хэндовера определен как набор процедур и решений, которые позволяют АС переходить из обслуживания одной БС к другой. Процесс хэндовера состоит из следующих этапов:

1. *Повторный выбор соты (cell reselection)*. В течение этого этапа АС выполняет сканирование и соединение с одной или несколькими соседними БС для того, чтобы определить, насколько эти БС подходят в качестве целевых для проведения хэндовера. Выполнение этой процедуры не требует завершения соединения с обслуживающей БС. После выполнения повторного выбора соты АС продолжает нормальную работу с обслуживающей БС.

2. *Принятие решения о хэндовере и его инициализация*. Процесс хэндовера начинается с решения о переводе всех соединений АС от обслуживающей БС к новой целевой БС. Это решение может быть принято абонентской станцией, базовой станцией, или некоторым другим внешним объектом сети WiMAX (в зависимости от построения сети). Когда решение о необходимости хэндовера принимает АС, она посылает сообщение MOB\_MSHO-REQ базовой станции, указывая одну или несколько соседних БС как целевых. Затем БС посылает сообщение MOB\_BSHO-RSP, указывая возможные БС для использования в качестве целевых в процессе хэндовера. Далее АС посылает сообщение MOB\_MSHO-IND, указывая какая из БС, перечисленных в сообщении MOB\_BSHO-RSP, использована для хэндовера.

Когда решение о необходимости хэндовера принимает БС, она посылает АС сообщение MOB\_BSHO-REQ, указывая одну или несколько БС в качестве целевых для проведения хэндовера. В этом случае АС посылает БС сообщение MOB\_MSHO-IND, указывая подтверждение принятия решения о хэндовере и выбранную целевую БС. После того, как процесс хэндовера был инициирован, АС может прервать его в любой момент.

3. *Синхронизация с целевой BS*. Как только определена целевая БС, АС синхронизируется с ней в прямом канале. АС начинает обработку преамбулы кадра в канале DL целевой БС. Преамбула кадра в прямом канале обеспечивает временную и частотную синхронизацию АС с целевой БС. Затем АС декодирует сообщения DL-MAP, UL-MAP (карты передачи вниз/вверх), DCD и UCD (дескрипторы прямого и обратного каналов) для того, чтобы получить информацию о канале для подсоединения к БС. Этот этап может быть укорочен, если целевая БС была оповещена о предстоящей процедуре хэндовера и выделила ресурсы абонентской станции для ее подключения.

4. *Подключение АС к целевой БС*. АС использует процедуру подключения для синхронизации обратного канала с БС, для получения информации о времени упреждения и необходимом уровне мощности. Процесс подключения похож на процесс, который используется при вхождении в сеть. АС может пропустить или сократить этот этап, если она выполнила соединение с целевой БС в течение этапа повторного выбора соты или этапа сканирования.

5. *Завершение соединения с обслуживающей БС.* После установления соединения с целевой БС, АС может принять решение о завершении соединения с обслуживающей БС, посылая БС сообщение MOB\_HO-IND. При получении этого сообщения БС запускает таймер удержания ресурса RTM (Resource-Retain Timer) и удерживает пакеты данных MAC PDU (MAC Protocol Data Unit, блоки данных MAC-уровня), связанные с данной абонентской станцией до окончания работы этого таймера. Как только время таймера RTM истекает, БС сбрасывает все пакеты данных MAC PDU, принадлежащие данной АС и процесс хэндовера считается завершенным. Длительность удержания информации составляет по умолчанию 200 мс.

Алгоритм хэндовера по запросу АС приведен на рис.3.26.

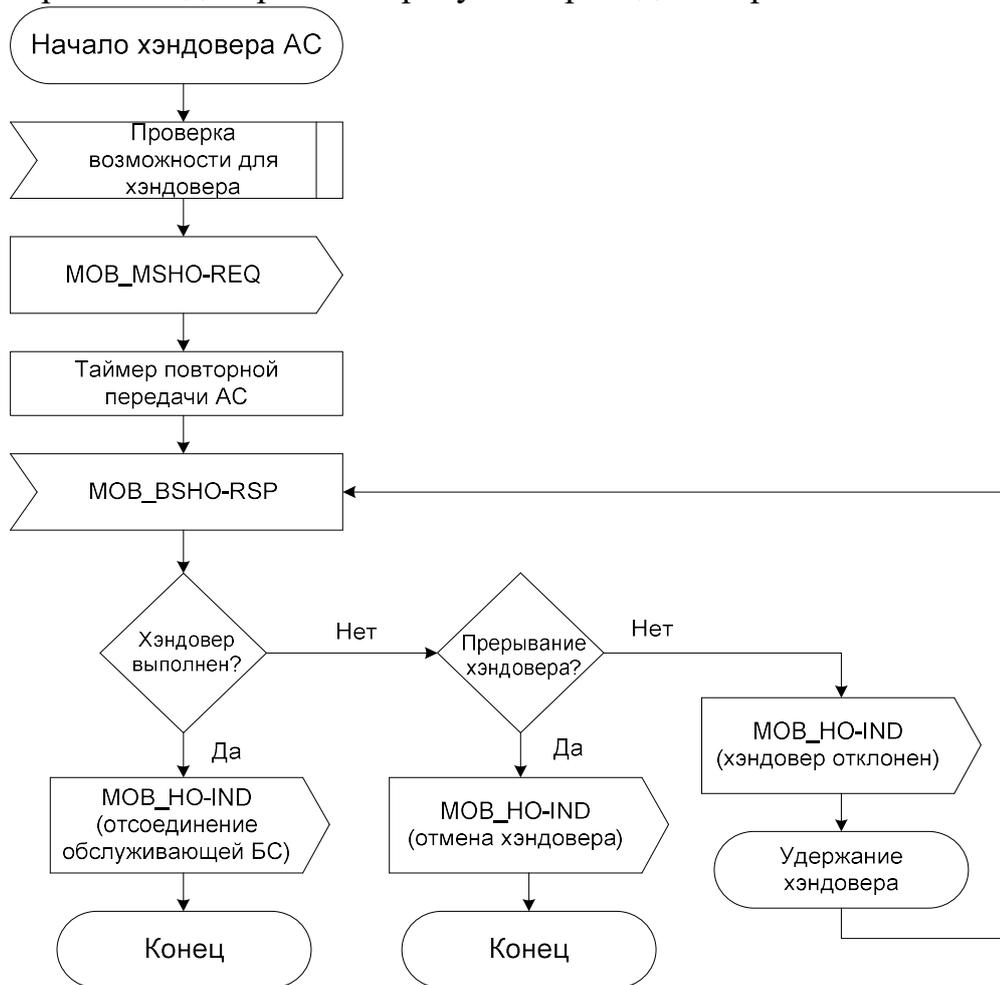


Рис.3.26. Процедура хэндовера по запросу АС.

При прерывании или отмене хэндовера АС выполняет процедуру повторного вхождения в сеть с целевой БС для восстановления соединения с сетью.