

# **Цифровое телерадиовещание в сетях беспроводного доступа**

## **Раздел 3**

### **Технологии пакетного доступа в сетях Wi-Fi**

### 3. Стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi)

#### 3.1. Структуры сетей Wi-Fi. Развитие стандарта

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. В сетях Wi-Fi абонентские терминалы связываются между собой и имеют доступ в сеть Интернета через точки доступа AP (Access Point) (рис.3.1).

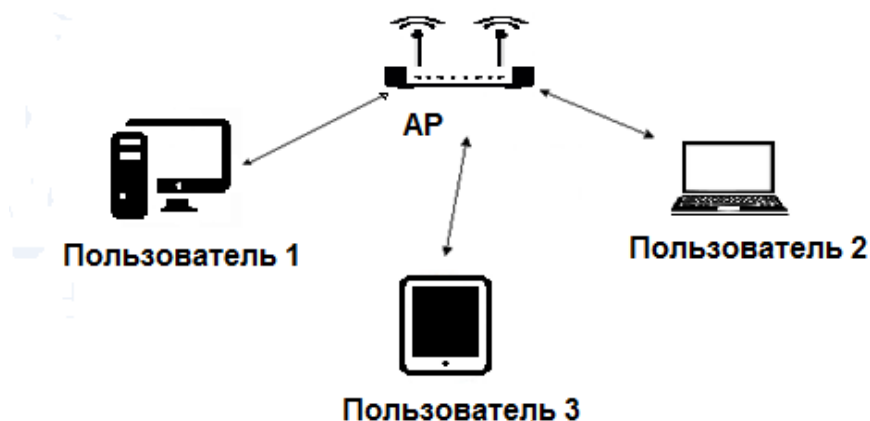


Рис.3.1. Структура сети Wi-Fi с точкой доступа

Точка доступа

- обеспечивает передачу трафика и сигнализации в радиоканале,
- управляет доступом абонентов к сети,
- производит обработку данных и сигнализации на уровне L2,
- ведет базу обслуживаемых абонентов (станций) и управляет этими станциями,
- обеспечивает выход в Интернет.

Стандарт IEEE 802.11 появился в 1997г. В настоящее время действуют следующие основные варианты спецификаций стандарта на физическом уровне:

- IEEE 802.11b
- IEEE 802.11a
- IEEE 802.11g
- IEEE 802.11n
- IEEE 802.11ac

Безопасность в Wi-Fi специфицирована в IEEE 802.11i, качественные показатели в IEEE 802.11e, роуминг в IEEE 802.11r.

Вышеперечисленные спецификации были в 2012г. объединены в единую спецификацию IEEE 802.11-2012, которую постоянно дополняют в связи с развитием стандарта.

Спецификации Wi-Fi относятся только к радиоинтерфейсу. Транспортная сеть, т.е. соединения AP со структурными элементами сети Интернета (коммутаторами и маршрутизаторами) не специфицированы.

### 3.2. Характеристики стандарта Wi-Fi на физическом уровне

Во всех вариантах передачу информации ведут в пакетном режиме, отдельными кадрами (пакетами).

Аппаратура стандарта 802.11b работает в диапазоне 2,4...2,483 ГГц

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 (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum) 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. При приеме сигнал подвергают корреляционной обработке, что существенно снижает влияние помех, как и в стандартах сотовой связи с кодовым разделением каналов. Сети стандарта 802.11b обеспечивают скорости передачи от 1 до 22 Мбит/с.

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. (рис. 3.4).

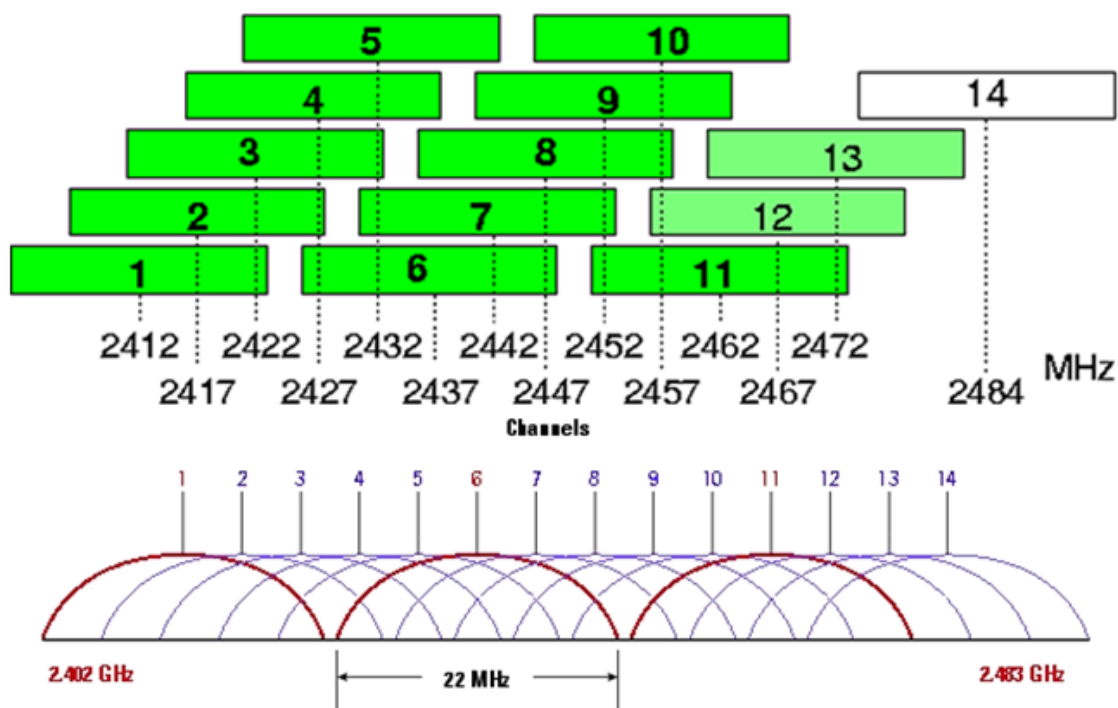


Рис. 3.4. Частотный план сетей Wi-Fi при использовании DSSS

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 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 технологию OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по ортогональным частотам. Этот метод используют для того, чтобы при высокой скорости передачи данных

устранить межсимвольную интерференцию из-за многолучевого распространения сигналов (рис. 3.5).

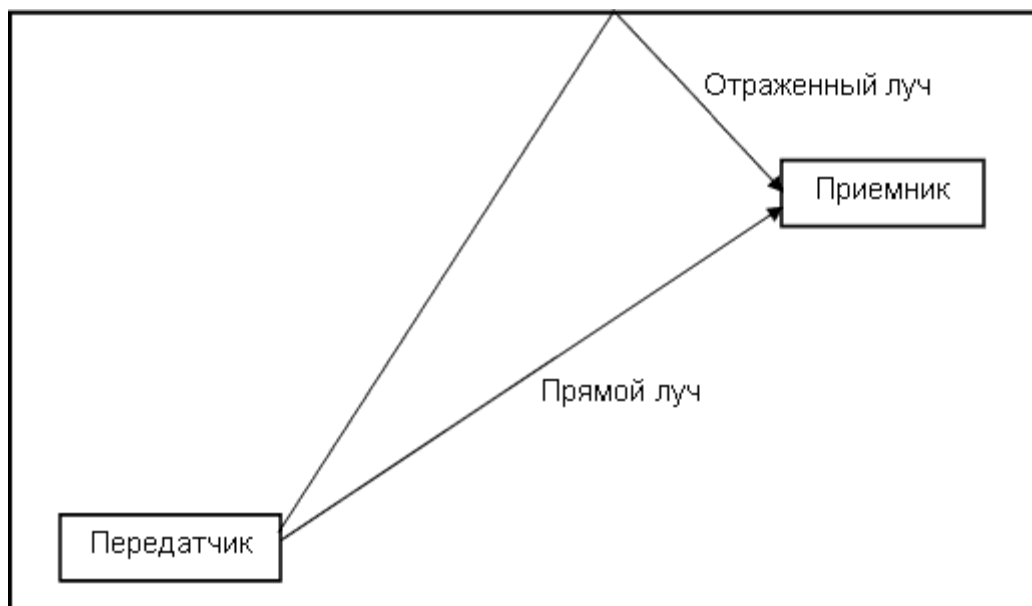


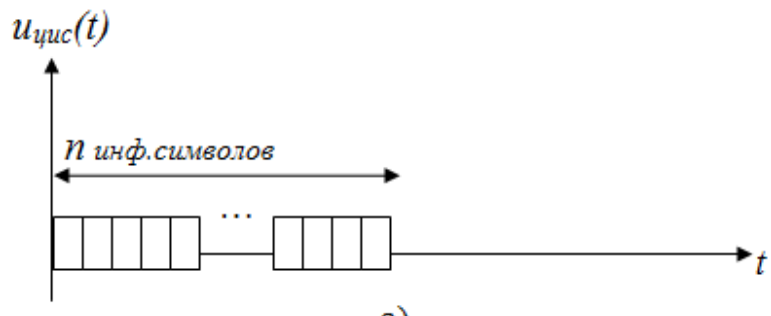
Рис.3.5. Многолучевое распространение сигналов

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

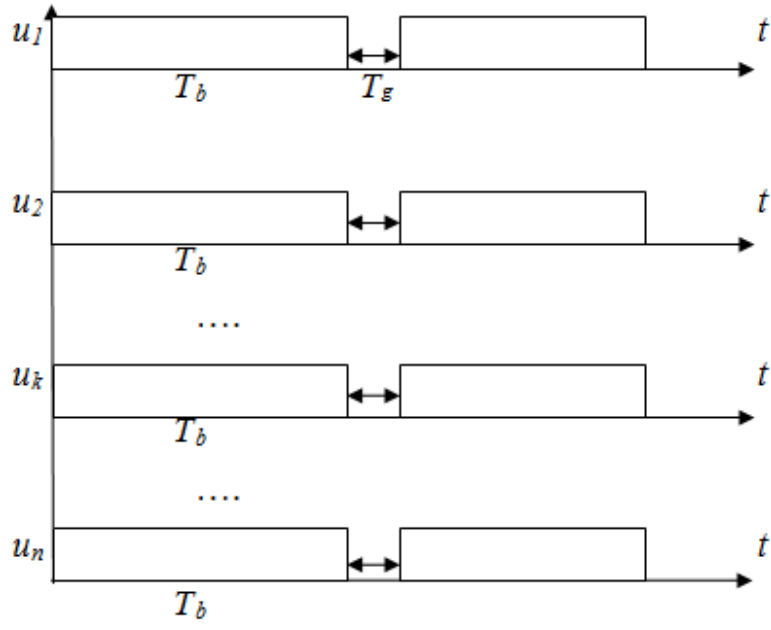
**Технологию OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – ортогональное частотное разнесение, используют для устранения межсимвольной интерференции в высокоскоростных радиоканалах. Вместо того, чтобы передавать  $n$  информационных символов цифрового информационного сигнала (ЦИС) на одной несущей частоте (рис. 3.6а), их передают одновременно на  $n$  поднесущих частотах, размещенных в полосе радиоканала (рис. 3.6б). 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.

Передача информационных символов по каналу связи представляет собой передачу комплексных чисел. Сигнальные созвездия при различных видах модуляции представлены на рис. 3.7.

Рассмотрим пример с передачей символов при модуляции 16-КАМ (рис. 3.8).



а)



б)

Рис. 3.6. Принцип технологии OFDM

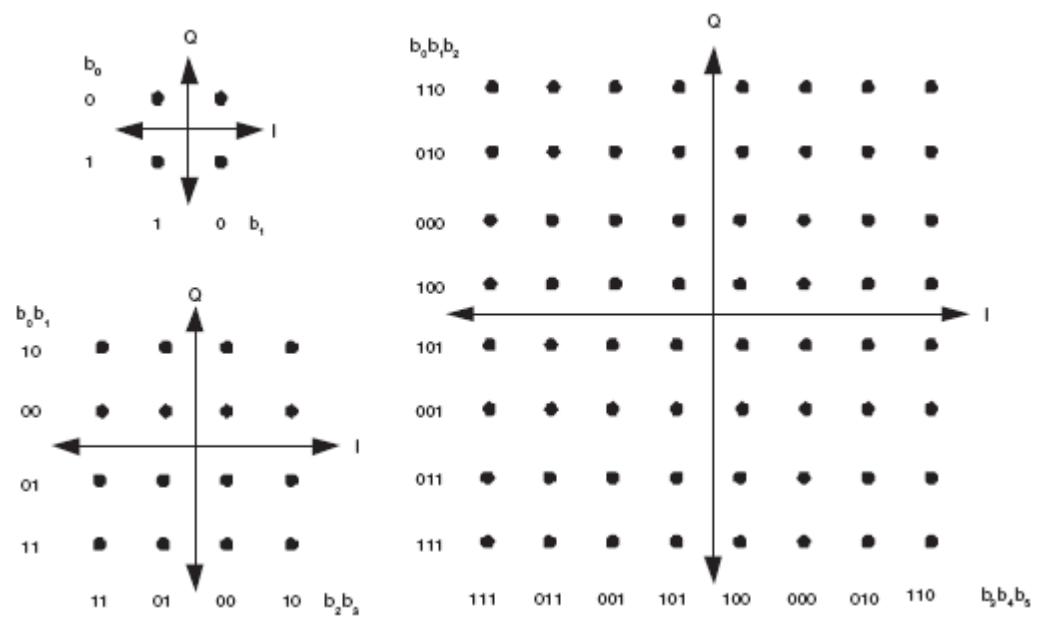


Рис. 3.7. Созвездия сигналов, используемых в Wi-Fi, WiMAX, LTE

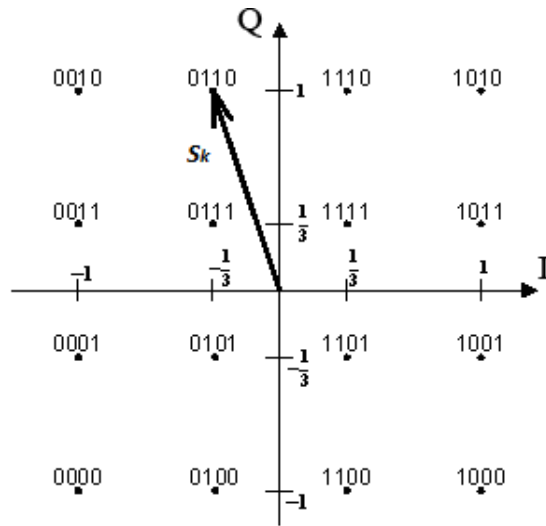


Рис. 3.8. Созвездие сигнала 16-QAM

Символ  $S_k$ , передаваемый на  $k$ -той поднесущей, можно представить как

$$S_k = |S_k| e^{j\varphi_k}, \text{ где амплитуда символа}$$

$$|S_k| = \sqrt{S_{ki}^2 + S_{kq}^2} \text{ и фаза символа}$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{S_{kq}}{S_{ki}}\right).$$

В примере на рис. 3.8,

$$|s_k| = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{1}{9}} = 1,055$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{1}{-3}\right) = \arctg(-3) = 1,89 \text{ рад}$$

В аналитическом виде сигнал OFDM представляет собой сумму гармоник:

$$u_{\text{OFDM}} = |s_1| e^{j\varphi_1} e^{j2\pi F_1 t} + |s_2| e^{j\varphi_2} e^{j2\pi F_2 t} + \dots + |s_k| e^{j\varphi_k} e^{j2\pi F_k t} + \dots \\ \dots + |s_n| e^{j\varphi_n} e^{j2\pi F_n t} \quad (3.1)$$

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  $u_{\text{OFDM}}$  используют процедуру обратного (быстрого) преобразования Фурье. На рис. 3.9 показаны поднесущие с частотами  $F_1$  и  $F_2$  и нулевыми начальными фазами на временном интервале  $T_b$ .

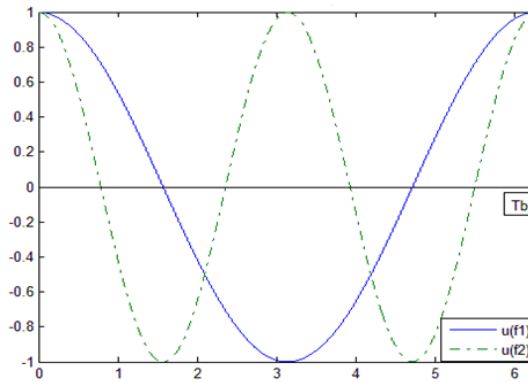


Рис.3.9. Две поднесущие на интервале  $0 - T_b$

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. 3.10). Поэтому приём сигнала OFDM и выделение отдельных символов осуществляют с использованием процедуры прямого (быстрого) преобразования Фурье.

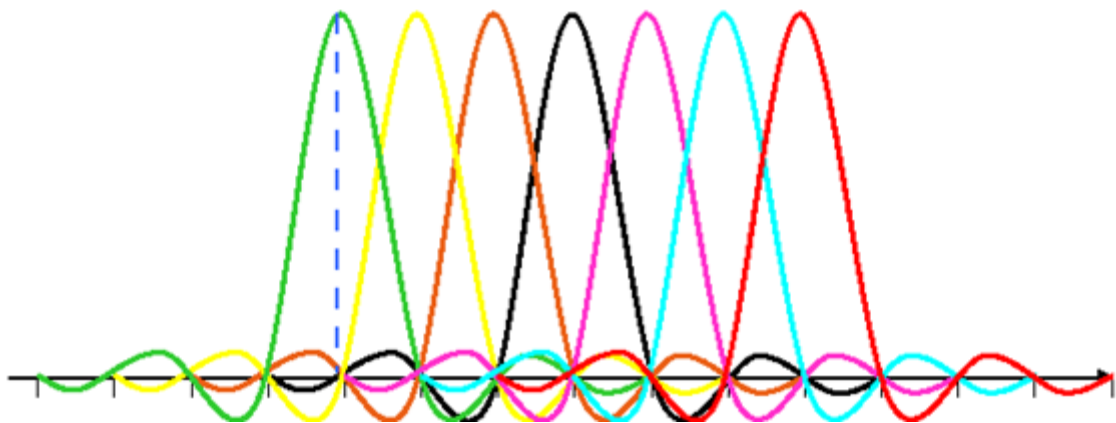


Рис.3.10. Спектр фрагмента OFDM-сигнала

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

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} u_{\text{OFDM}} e^{-j2\pi(kF_1)t} dt \quad (3.2)$$

На частоте  $F_k = kF_1$

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |s_k| e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi(kF_1)t} e^{j2\pi(kF_1)t} dt = |s_k| e^{j\varphi_k} \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} dt = |s_k| e^{j\varphi_k} \quad (3.3)$$

На любой другой поднесущей  $F_p = pF_1$

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |s_p| e^{j\varphi_p} e^{j2\pi(pF_1)t} e^{-j2\pi(kF_1)t} dt = |s_p| e^{j\varphi_p} \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} e^{j2\pi(p-k)F_1 t} dt = 0, \quad (3.4)$$

поскольку интеграл (площадь) синусоиды за время одного периода равен 0 (рис.3.11), а на интервале  $T_b$  уложено целое число  $|p-k|$  периодов синусоиды<sup>1</sup>.

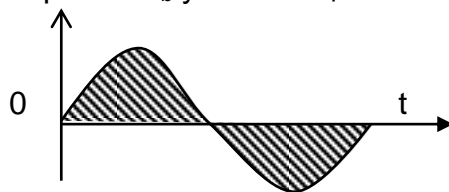


Рис. 3.11. К определению площади синусоиды

Следовательно, при точном выборе времени интегрирования помехи от сигналов других поднесущих равны 0. Однако, при вычислении интегралов (4.2) необходимо запускать функции  $e^{-j2\pi(kF_1)t}$  с нулевой начальной фазой, т.е. обеспечить **когерентный приём сигнала  $u_{OFDM}$** . С этой целью точка доступа (AP) в радиоканале вниз и терминал абонента в радиоканале вверх кроме информационных символов передают **опорные сигналы**, т.е. заранее известные комплексные числа  $C(n)$ , принимая которые приёмник обеспечивает необходимую фазовую коррекцию и масштабирование амплитуд принятых сигналов.

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 защитном интервале  $T_g$  между символами (рис.4.12) передают циклический префикс (CP – Cyclic Prefix) – конец следующего символа длительностью  $T_g$  (рис. 3.12).

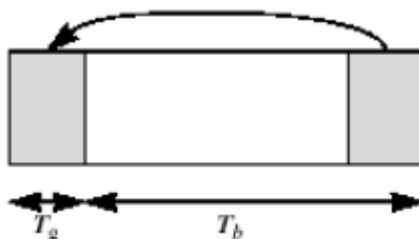


Рис. 3.12. OFDM-символ с циклическим префиксом

Это делают для **снижения внутрисимвольных помех** (внутрисимвольной интерференции). Если бы циклического префикса не было, то при вычислении интеграла (3.2) 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 (3.3), а интегралы (3.4) 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 (3.4) равны нулю.

В стандарте 802.11a ширина радиоканала – 20 МГц. Для передачи информации используют 48 поднесущих (всего 52). На 4 поднесущих передают опорные сигналы. Длительность символа  $T_s = 3,2$  мкс, длительность паузы  $T_g = 0,8$

<sup>1</sup> Фактически при передаче используют дискретное быстрое обратное преобразование Фурье, а при приеме дискретное быстрое прямое преобразование Фурье.



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)

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

При переходе к многопозиционным методам модуляции

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

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

Основные характеристики стандарта 802.11a приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Скорость передачи данных Мбит/с	Модуляция	Скорость кодирования	Число бит в символе	Число кодированных бит в OFDM символе	Число информационных 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

**Стандарт 802.11g** объединяет возможности стандартов 802.11a и b в диапазоне 2,4...2,483 ГГц. Сети стандарта могут работать со скоростями 1; 2; 5,5; 6; 9; 11; 12; 18; 22; 24; 33; 36; 48; 54 Мбит/с. При передаче со скоростями 6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; и 54 Мбит/с используют технологию OFDM.

Следующий этап развития Wi-Fi – **стандарт IEEE802.11n**. Цель разработки – повышение скоростей передачи. Сегодня аппаратура стандарта 802.11n является самой распространенной. По сравнению со стандартами 802.11a и 802.11g изменены следующие параметры:

- число информационных поднесущих (трафика) в полосе 20 МГц увеличено с 48 до 52,

- опционально может быть уменьшен защитный интервал  $T_g$  до 0,4 мкс.

Кроме того, в стандарт 802.11n добавлены технологии объединения соседних рабочих полос (channel bonding) и пространственного

мультиплексирования (MIMO). Внешний вид аппаратуры при использовании MIMO с 3 антеннами показан на рис. 3.13.



Рис. 3.13. Аппаратура с тремя антеннами

При объединении соседних полос суммарная полоса увеличивается в 2 раза, до 40 МГц. При этом в полосе 40 МГц передачу ведут на 114 поднесущих, из которых 108 предназначены для передачи трафика.

При использовании пространственного мультиплексирования можно передавать в рабочей полосе одновременно 2, 3 или 4 независимых потока данных.

В результате в стандарте 802.11n специфицированы 32 модуляционно-кодированные схемы (MCS). Скорости передачи данных в кадре для этих схем приведены в табл. 3.2.

Сети стандарта 802.11n могут работать как в диапазоне 2,4 ГГц, так и в диапазоне 5 ГГц.

Таблица 3.2

MCS	Модуляция	Скорость кодирования	Число потоков	В (Мбит/с) в полосе 20 МГц		В (Мбит/с) в полосе 40 МГц	
				$T_g = 0,8$ мкс	$T_g = 0,4$ мкс	$T_g = 0,8$ мкс	$T_g = 0,4$ мкс
MCS0	2-ФМ	1/2	1	6,5	7,2	13,5	15
MCS1	4-ФМ	1/2	1	13	14,4	27	30
MCS2	4-ФМ	3/4	1	19,5	21,7	40,5	45
MCS3	16-КАМ	1/2	1	26	28,9	54	60
MCS4	16-КАМ	3/4	1	39	43,3	81	90
MCS5	64-КАМ	2/3	1	52	57,8	108	120
MCS6	64-КАМ	3/4	1	58,5	65	121,5	135
MCS7	64-КАМ	5/6	1	65	72,2	135	150
MCS8	2-ФМ	1/2	2	13	14,4	27	30
MCS9	4-ФМ	1/2	2	26	28,9	54	60
MCS10	4-ФМ	3/4	2	39	43,3	81	90
MCS11	16-КАМ	1/2	2	52	57,8	108	120
MCS12	16-КАМ	3/4	2	78	86,7	162	180
MCS13	64-КАМ	2/3	2	104	115,6	216	240
MCS14	64-КАМ	3/4	2	117	130	243	270
MCS15	64-КАМ	5/6	2	130	144,4	270	300

MCS16	2-ФМ	1/2	3	19,5	21,7	40,5	45
MCS17	4-ФМ	1/2	3	39	43,3	81	90
MCS18	4-ФМ	3/4	3	58,5	65	121,5	135
MCS19	16-КАМ	1/2	3	78	86,7	162	180
MCS20	16-КАМ	3/4	3	117	130	243	270
MCS21	64-КАМ	2/3	3	156	173,3	324	360
MCS22	64-КАМ	3/4	3	175,5	195	364,5	405
MCS23	64-КАМ	5/6	3	195	216,7	405	450
MCS24	2-ФМ	1/2	4	26	28,9	54	60
MCS25	4-ФМ	1/2	4	52	57,8	108	120
MCS26	4-ФМ	3/4	4	78	86,7	162	180
MCS27	16-КАМ	1/2	4	104	115,6	216	240
MCS28	16-КАМ	3/4	4	156	173,3	324	360
MCS29	64-КАМ	2/3	4	208	231,1	432	480
MCS30	64-КАМ	3/4	4	234	260	486	540
MCS31	64-КАМ	5/6	4	260	288,9	540	600

Частотный план сетей 802.11n в диапазоне 2,4 ГГц соответствует частотному плану стандарта 802.11g (рис.3.4). Частотный план сетей 802.11n в диапазоне 5 ГГц различен для различных стран и совпадает с частотным планом сетей 802.11ac.

Сети стандарта **IEEE802.11ac** являются дальнейшим развитием сетей Wi-Fi. В этих сетях для увеличения скоростей передачи данных, кроме каналов с полосами 20 и 40 МГц, предусмотрено расширение полосы до 80 МГц (опционально до 160 МГц), применение модуляции 256-КАМ и увеличение числа потоков при использовании пространственного мультиплексирования до 4 (8). Сети этого варианта стандарта работают только в диапазоне 5 ГГц. Частотные планы сетей 802.11ac показаны на рис. 3.14<sup>2</sup>.

Диапазон	UNII-1				UNII-2				
Частоты	5150 – 5250 МГц				5250 – 5330 МГц				
Номера каналов 20 МГц	34	36	40	44	48	52	56	60	64
Номера каналов 40 МГц	38		46		54		62		
Номера каналов 80 МГц	42				58				
Номера каналов 160 МГц	50								

Диапазон	UNII-2-Ext											
Частоты	5490 – 5730 МГц											
Номера каналов 20 МГц	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140	144
Номера каналов 40 МГц	102		110		118		126		134		142	
Номера каналов 80 МГц	106				122				138			
Номера каналов 160 МГц	114											

Диапазон	UNII-3				ISM	
Частоты	5735 – 5815 МГц				5815 – 5835 МГц	
Номера каналов 20 МГц	149	153	157	161	165	
Номера каналов 40 МГц	151		159			
Номера каналов 80 МГц	155					

Рис. 3.14. Частотные планы сетей 802.11ac

<sup>2</sup> UNII - Unlicensed National Information Infrastructure; ISM - industrial, scientific and medical radio band

Скорости передачи данных в сетях стандарта 802.11ac при использовании от 1 до 3 потоков при пространственном мультиплексировании приведены в табл. 3.3<sup>3</sup>.

Таблица 3.3

MCS	Модуляция	Число бит на символ	Скорость кодирования	В (Мбит/с) в полосе 20 МГц		В (Мбит/с) в полосе 40 МГц		В (Мбит/с) в полосе 80 МГц		В (Мбит/с) в полосе 160 МГц	
				0,8	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4
				МКС	МКС	МКС	МКС	МКС	МКС	МКС	МКС
<b>1 пространственный поток</b>											
MCS0	2-ФМ	1	1/2	6,5	7,2	13,5	15	29,3	32,5	58,5	65
MCS1	4-ФМ	2	1/2	13	14,4	27	30	58,5	65	117	130
MCS2	4-ФМ	2	3/4	19,5	21,7	40,5	45	87,8	97,5	175,5	195
MCS3	16-КАМ	4	1/2	26	28,9	54	60	117	130	234	260
MCS4	16-КАМ	4	3/4	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
MCS5	64-КАМ	6	2/3	52	57,8	108	120	234	260	468	520
MCS6	64-КАМ	6	3/4	58,5	65	131,5	135	263,3	292,5	526,5	585
MCS7	64-КАМ	6	5/6	65	72,2	135	150	292,5	325	585	650
MCS8	256-КАМ	8	3/4	78	86,7	162	180	351	390	702	780
MCS9	256-КАМ	8	5/6	Не использ. -		180	200	390	433,3	780	866,7
<b>2 пространственных потока</b>											
MCS0	2-ФМ	1	1/2	13	14,4	27	30	58,5	65	117	130
MCS1	4-ФМ	2	1/2	26	28,9	54	60	117	130	234	260
MCS2	4-ФМ	2	3/4	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
MCS3	16-КАМ	4	1/2	52	57,8	108	120	234	260	468	520
MCS4	16-КАМ	4	3/4	78	86,7	162	180	351	390	702	780
MCS5	64-КАМ	6	2/3	104	115,6	216	240	468	520	936	1040
MCS6	64-КАМ	6	3/4	117	130	243	270	526,5	585	1053	1170
MCS7	64-КАМ	6	5/6	130	144,4	270	300	585	650	1170	1300
MCS8	256-КАМ	8	3/4	156	173,3	324	360	702	780	1404	1560
MCS9	256-КАМ	8	5/6	Не использ. -		360	400	708	866,7	1560	1733
<b>3 пространственных потока</b>											
MCS0	2-ФМ	1	1/2	19,5	21,7	40,5	45	87,8	97,5	175,5	195
MCS1	4-ФМ	2	1/2	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390

<sup>3</sup> Всего в сетях 802.11ac можно передавать в одном канале до 8 пространственных потоков данных.

MCS2	4-ФМ	2	3/4	58,5	65	121,5	135	263,3	292,5	526,5	585
MCS3	16-КАМ	4	1/2	78	86,7	162	180	351	390	702	780
MCS4	16-КАМ	4	3/4	117	130	243	270	526,5	585	1053	1170
MCS5	64-КАМ	6	2/3	156	173,3	324	360	702	780	1404	1560
MCS6	64-КАМ	6	3/4	175,5	195	364,5	405	Не использ -		1579	1755
MCS7	64-КАМ	6	5/6	195	216,7	405	450	877,5	975	1755	1950
MCS8	256-КАМ	8	3/4	234	260	486	540	1053	1170	2106	2340
MCS9	256-КАМ	8	5/6	260	288,9	540	600	1170	1300	Не использ -	

К сожалению, реальные скорости передачи данных в сетях Wi-Fi могут быть значительно ниже скоростей, приведенных в табл. 3.1, 3.2 и 3.3. Передача трафика в сетях Wi-Fi идет кадрами (фреймами). В разных вариантах стандарта структуры фреймов несколько отличаются друг от друга. На рис. 3.15 показана структура фрейма на физическом уровне PPDU (PLCP Data Unit; PLCP – Physical Layer Convergence Procedure) в стандарте 802.11a.

L-STF	L-LTF	L-SIG	Service	PSDU	Tail	Pad
8 мкс	8 мкс	4 мкс	16 бит	Длина переменная	6 бит	

Рис. 3.15. Структура фрейма PPDU в стандарте 802.11a

Фрейм начинается с преамбулы PLCP, состоящей из участков с короткими символами (L-STF – Short Training Field) и длинными символами (L-LTF – Long Training Field). Преамбула фиксирует начало фрейма, обеспечивает синхронизацию при приеме и установку параметров АРУ приемника. Длина преамбулы 16 мкс. Поле L-SIG (Signal) определяет длину информационной части фрейма PSDU (PLCP Service Data Unit) и скорость передачи данных в PSDU (модуляционно-кодирующую схему). PSDU представляет собой информационный фрейм MPDU (MAC Protocol Data Unit), сформированный на логическом подуровне L2 MAC после выполнения на физическом уровне процедур скремблирования, избыточного кодирования и перемежения. Поля Service и Tail, необходимые для дескремблирования и декодирования принятого сигнала, равно как и поле Pad (Padding), состоящее из добавочных бит, чтобы получить целое число передаваемых OFDM-символов, ввиду своих небольших размеров мало влияют на результирующую скорость передачи данных, в то время как передача преамбулы и поля L-SIG занимает 20 мкс.

Во фреймах стандартов 802.11n и 802.11ac несколько меняются структуры преамбулы и полей управления, но принцип организации фрейма соответствуют показанному на рис.3.16. Приведенные в табл. 3.1, 3.2 и 3.3 **скорости передачи относятся к информационной части фрейма (PSDU)**, время передачи которой зависит от объема PSDU и скорости передачи данных. Чем меньшую часть составляет время передачи PSDU, тем больше будет снижение реальной скорости передачи в сравнении с табличной. В реальности дело обстоит ещё хуже из-за времязатратного протокола доступа станций к сети, который рассмотрен далее. Для обеспечения высоких скоростей передачи в стандартах 802.11n и

802.11ac используют технологию **агрегации** (объединения) **информационных фреймов**, что позволяет существенно увеличить время передачи информационной части PSDU.

### 3.3. Доступ к сети и обеспечение качества обслуживания

Для передачи кадра станция должна занять выделенный частотный канал связи. Основным методом доступа к сети является **множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий** (CSMA/CA – carrier sense multiple access with collision avoidance). Передающая станция проверяет, занят ли канал, и прежде чем начать передачу кадра, ожидает его освобождения.

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, включая точку доступа AP, имеют одинаковый приоритет и занимают канал на основе состязаний с таймерами отката. При состязаниях станция устанавливает таймер отката случайным образом в заданном диапазоне (окне состязаний CW – contention window), рис. 3.16<sup>4</sup>. В процессе состязаний происходит считывание содержимого таймера по временным слотам. При достижении нуля станция получает право занять канал.

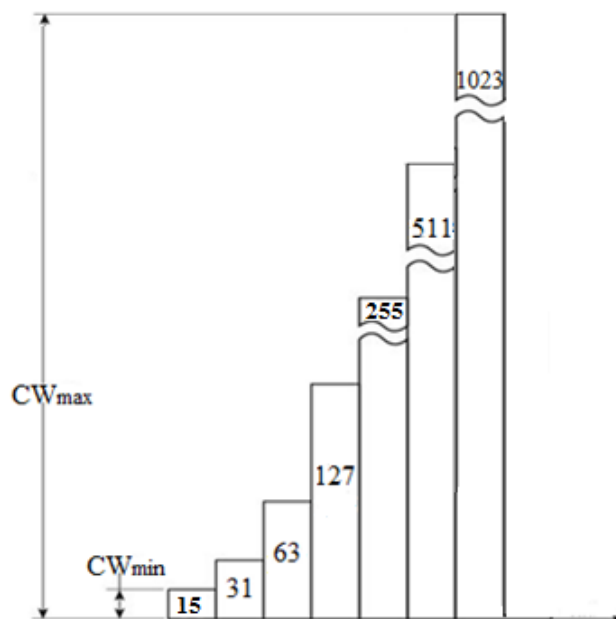


Рис. 3.16. Возможные значения окон состязаний

Принцип действия DCF поясняет рис. 3.17. На нем показано, как станции занимают каналы; показан также случай возникновения коллизии, т.е. одновременной передачи кадров двумя станциями. Перед началом состязаний обязателен межкадровый интервал DIFS. При этом станция, принявшая кадр, должна ответить отправителю кадром подтверждения. Принятый кадр и кадр подтверждения ACK разделяют коротким межкадровым интервалом SIFS (рис. 3.18).

<sup>4</sup> Минимальное окно  $CW_{min}=15$  возможно только в сетях IEEE802.11n и IEEE802.11ac

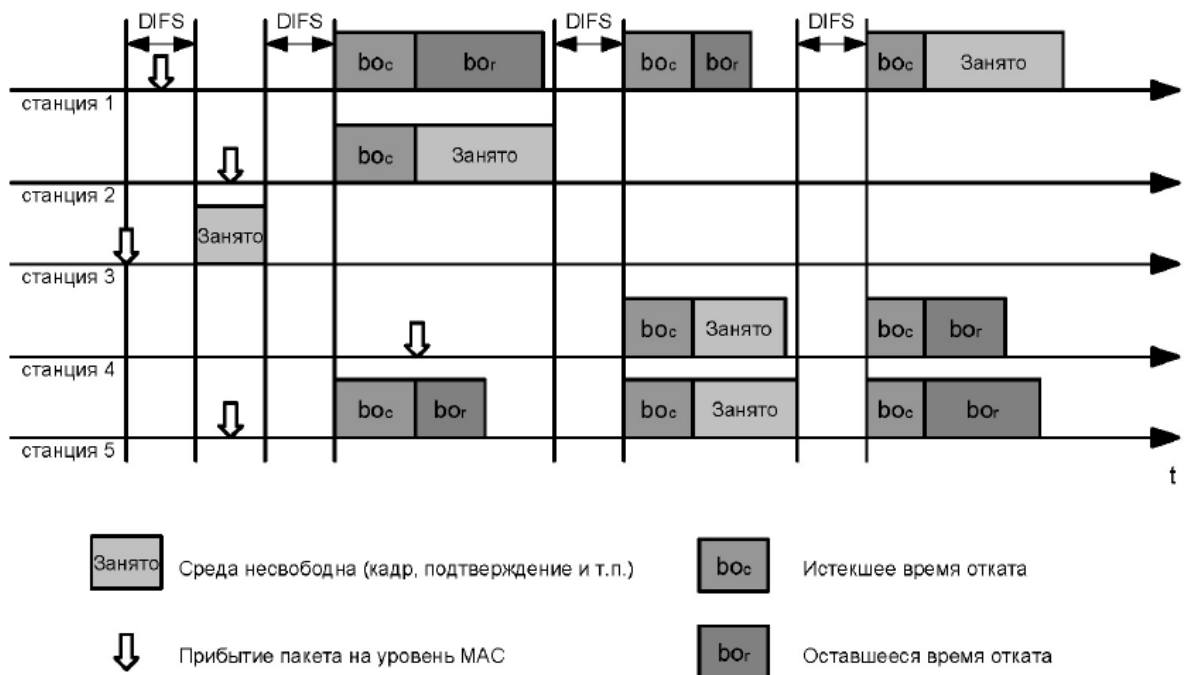


Рис. 3.17. Работа станций в режиме DCF

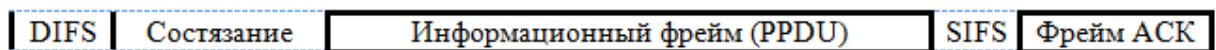


Рис. 3.18. Передача кадра в режиме DCF

Параметры DIFS, SIFS и длительность временных слотов для различных вариантов стандарта приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

IFS	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n 2,4 ГГц	802.11n 5ГГц
SIFS, мкс	10	10	16	10	16
Длина слота, мкс	20	20 (длинный) 9 (короткий)	9	20 (длинный) 9 (короткий)	9
DIFS, мкс	50	50 (длинный) 28 (короткий)	34	50 (длинный) 28 (короткий)	34

На самом деле в сетях Wi-Fi передача идет суперкадрами, длину которых и структуру регулирует точка доступа (AP). В начале суперкадра AP передает кадр маяка, содержащий системную информацию (в том числе необходимую для подключения станций к сети) и описывающий структуру суперкадра. Кроме доступа к сети на основе DCF, возможен доступ с использованием **точечной координатной функции** PCF (point coordination function). В этом периоде суперкадра станции выходят на связь только по опросу AP (рис. 3.19). Метод PCF неоптимален с точки зрения использования канального ресурса, но его иногда применяют при передаче IP-телефонии, где необходимо минимизировать задержки сигнала.

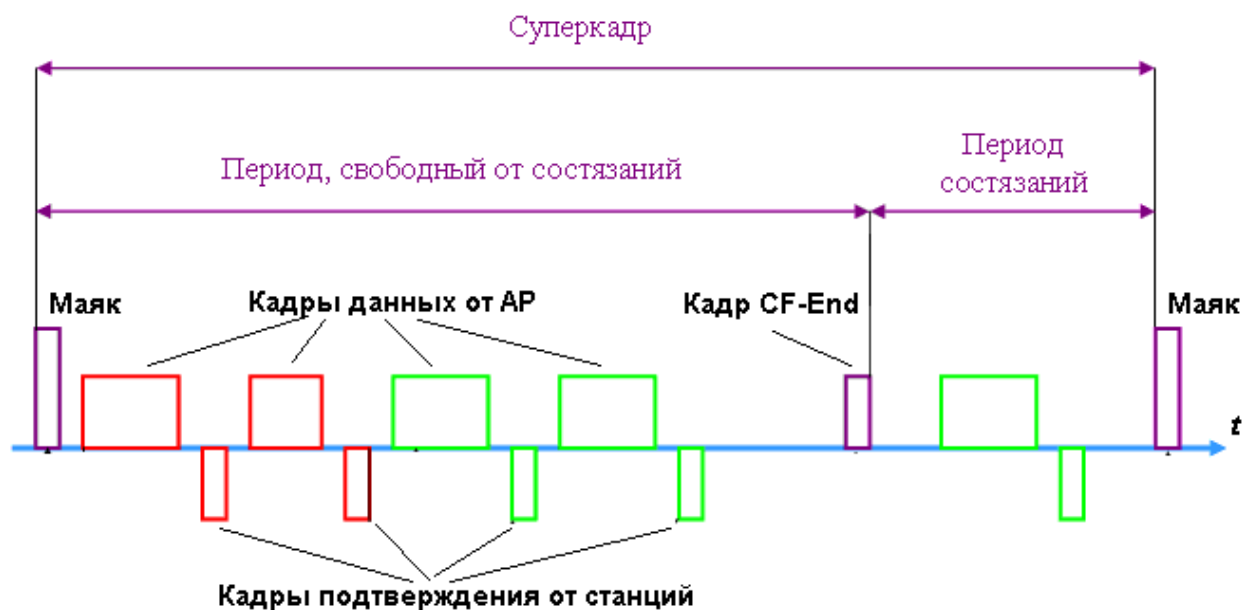


Рис. 3.19. Передача данных в суперкадре

Сети Wi-Fi поддерживают 4 класса трафика, расставленные 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.

Для доступа к сети используют **гибридную координатную функцию** (*hybrid coordination function, HCF*). HCF определяет два механизма доступа к среде:

- доступ к каналу, основанный на состязании (contention-based channel access);
- управляемый доступ к каналу (controlled channel access).

Доступу к каналу, основанному на состязании, соответствует расширенный распределенный доступ к каналу (*enhanced distributed channel access, EDCA*), а управляемому доступу к каналу соответствует доступ к каналу, управляемому HCF (*HCF controlled channel access, HCCA*). Внутри суперфрейма возможны 2 фазы работы: периоды состязания (CP) и свободные от состязания периоды (CFP). EDCA используют только в CP, а HCCA используют в обоих периодах. HCF объединяет методы DCF и PCF, поэтому ее называют гибридной. В HCF в зависимости от класса трафика можно менять размеры окна состязаний, а также длину межкадрового промежутка при работе с состязаниями. Вместо одинакового для всех станций DIFS вводят регулируемую величину AIFS (Arbitration Interframe Space), длительность которого зависит от класса трафика (рис. 3.20).



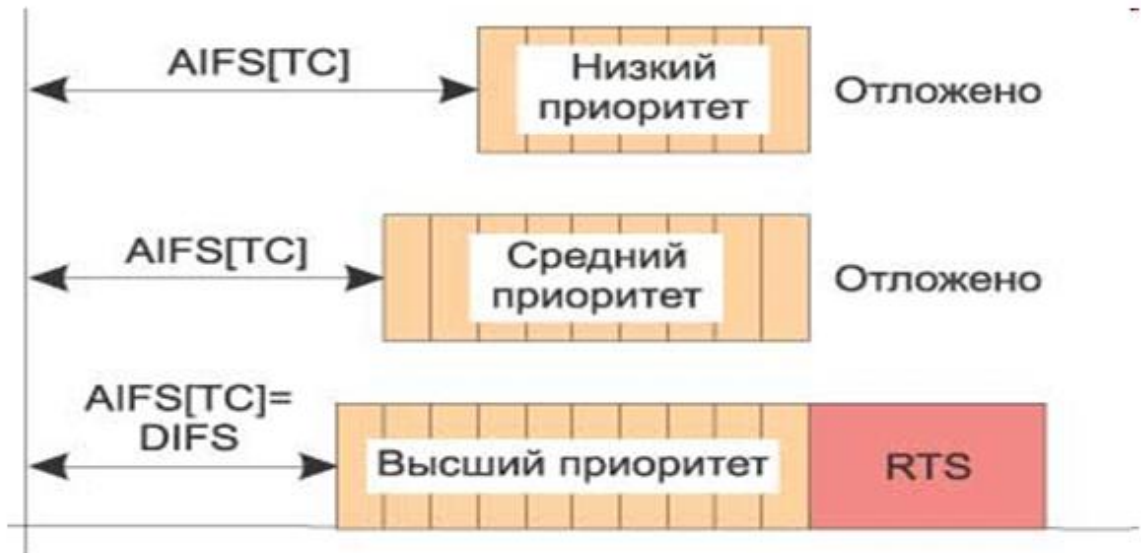


Рис. 3.20. Изменение AIFS в зависимости от класса трафика