



# Технологии Wi-Fi

Отдел аспирантуры, Кандзюба Е.В.  
2016 год.

# Технологии Wi-Fi



## Эволюция технологии

Отцом-основателем Wi-Fi является австралийский инженер Джон О'Салливан, который в 1991 году разработал первую версию протокола. В этом же году американская компания At&t выпускает первое устройство беспроводной передачи данных, которое работает на частоте 2.4GHz. Устройство назвали WaveLan.

Стоит отметить, что скорость передачи данных составляла не более 2 Мбит/с

1997 год - выходит спецификация IEEE 802.11, которая не имела особых отличий от WaveLan. Скорость передачи данных не более 2 Мбит/с.

2000 год появляется новая спецификация 802.11b. Скорость передачи данных до 11 Мбит/с.

2002 год — выходит новая версия — 802.11a. Частота 5 GHz. Скорость обмена до 54 Мбит/с.

2003 год ознаменован появлением 802.11g. 54 Мбит/с теперь возможно и на частоте 2.4GHz. Появился протокол шифрования WPA.

2004 год — шифрование переходит на новый уровень безопасности. Мир увидел WPA2. Хакеры ищут новые способы взлома.

2009 год — официально представлены устройства с поддержкой стандарта 802.11n. Скорость передачи данных до 600 Мбит/с на частотах 5 GHz и 2.4GHz. Данный стандарт используется в большинстве современных смартфонов 2016 года.

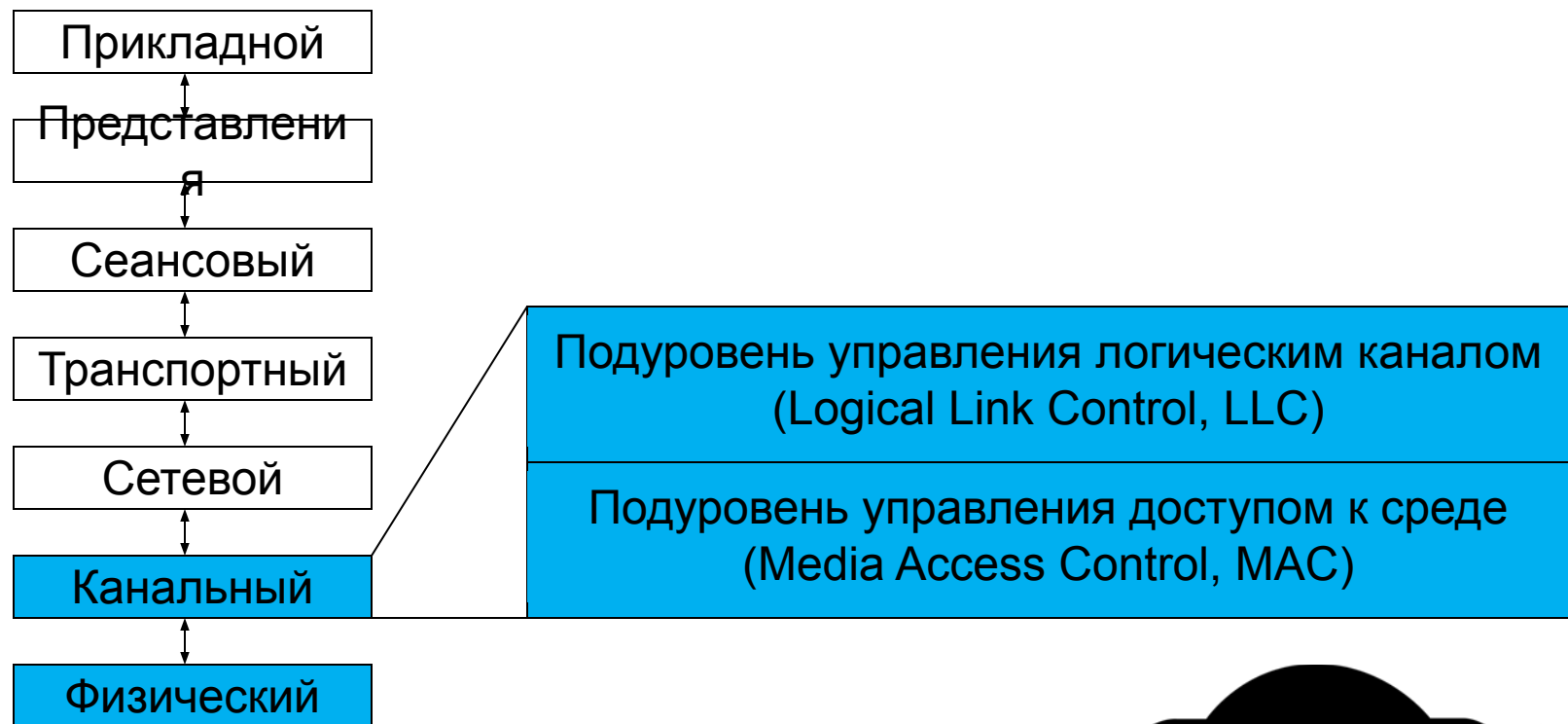
2014 год — появляется стандарт 802.11ac. Скорость передачи данных более 1 Гбит/с.

2016 год — ведется разработка стандарта 802.11ad. Скорость передачи данных от 7 Гбит/с. Работа в диапазоне 60 ГГц.

# Технологии Wi-Fi



## Место Wi-Fi в модели OSI



# Технологии Wi-Fi



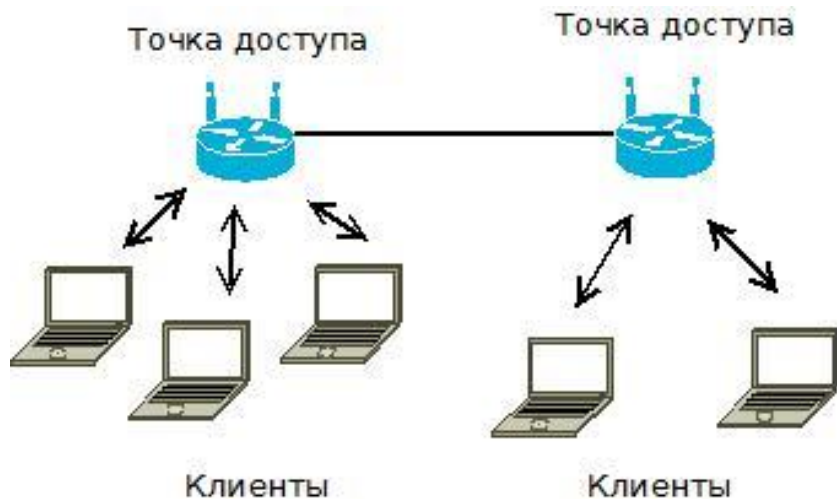
## Место Wi-Fi в модели OSI

- Физический уровень – способ передачи сигналов
  - 6 стандартов IEEE серии 802.11
- Уровень MAC – способ доступа к общей среде:
  - Один общий способ для всех 6 вариантов физического уровня
- Уровень LLC – передача данных
  - Один общий способ

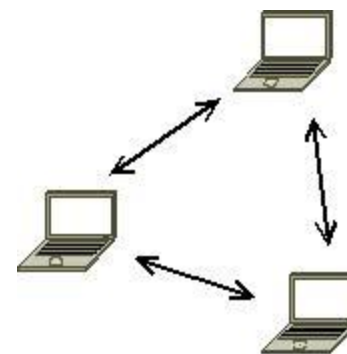
# Технологии Wi-Fi



## Режимы работы Wi-Fi



Инфраструктурный  
режим



Произвольный  
режим  
(ad hoc)

# Технологии Wi-Fi



## Wi-Fi и Ethernet

Технология Wi-Fi похожа на Ethernet

- Адресация – MAC-адреса

Разделяемая среда:

- Ethernet – кабели
- Wi-Fi – радиозэфир

Общий формат кадра уровня LLC

- Стандарт IEEE 802.2

# Технологии Wi-Fi



## Стандарты физического уровня Wi-Fi

Название	Год	Скорость	Частота	Ширина
802.11	1997	1 и 2 Мб/с	2,4 ГГц	
802.11a	1999	54 Мб/с	5 ГГц	20-40 МГц
802.11b	1999	11 Мб/с	2,4 ГГц	20-40 МГц
802.11g	2003	54 Мб/с	2,4 ГГц	20-40 МГц
802.11n	2009	600 Мб/с 150 Мб/с одна станция	2,4 и 5 ГГц	20-40 МГц
802.11ac	2014	6.77 Гб/с 1.69 Гб/с одна станция	5 ГГц	До 160 МГц
802.11ad	2016	До 7 Гбит/с	60 ГГц	2160 МГц

# Технологии Wi-Fi



## Физический уровень Wi-Fi

Инфракрасное излучение

- 802.11, устаревший метод

Электромагнитное излучение:

- 2,4 ГГц – 802.11b, 802.11g, 802.11n
- 5 ГГц – 802.11a, 802.11n, 802.11ac
- 60 ГГц – 802.11ad

Диапазоны 2,4, 5 ГГц и 60 ГГц не требуют лицензирования:

- Можно использовать свободно
- Для частот 2,4 и 5 ГГц другие устройства также используют этот диапазон и создают помехи .



# Технологии Wi-Fi



## Особенности радиоканала



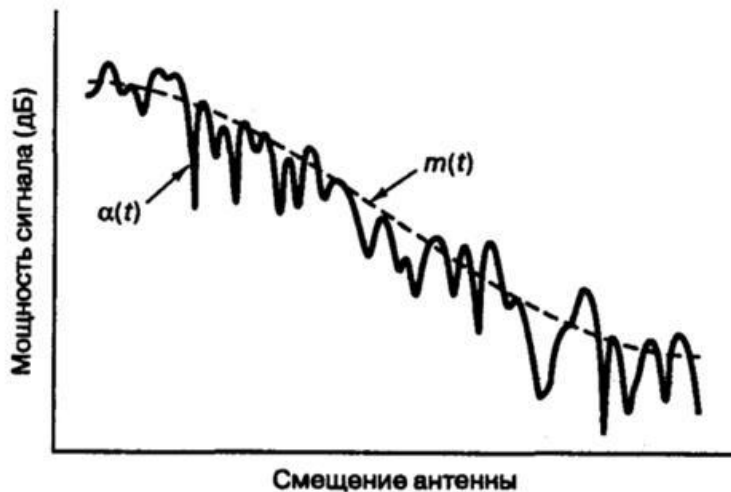
- Необходима **прямая видимость** между точкой доступа AP и станцией STA  
Характер распространения определяется следующими процессами:
- **Отражение** при наличии на трассе гладких поверхностей, много превышающих длину волны (12–13 см)
  - **Дифракция** – огибание препятствий, препятствующих прямому прохождению сигнала (на краях стен, зданий, крышах)
  - **Рассеяние** – наблюдается при наличии шероховатой поверхности на пути радиоволны, размеры которой соизмеримы с длиной волны (столбы, вывески, знаки, деревья)

# Технологии Wi-Fi



## Особенности радиоканала: Замирания сигнала (фединг)

**Крупномасштабные замирания** – связаны с расстоянием до приемной антенны



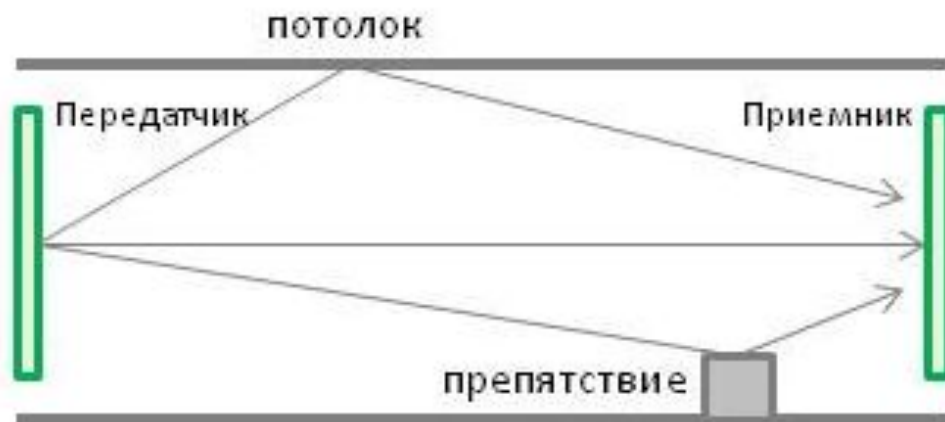
**Мелкомасштабные замирания** – связаны с изменением амплитуды и фаз сигнала



# Технологии Wi-Fi



Особенности радиоканала: Многолучевое распространение



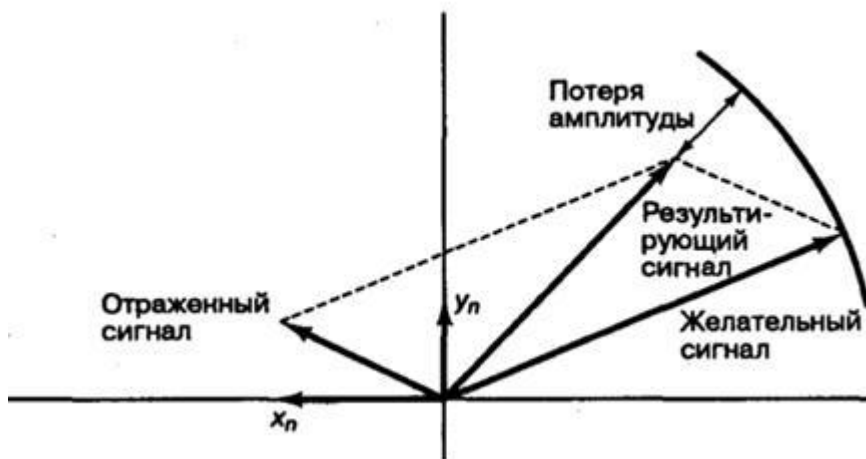
- Межсимвольная интерференция
- Отрицательная интерференция (**Downfade**)
- Положительная интерференция (**Upfade**)
- Обнуление сигнала (**Nulling**)

# Технологии Wi-Fi

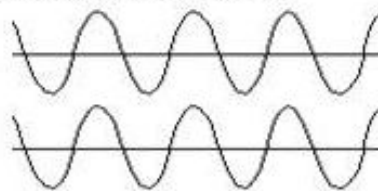


## Особенности радиоканала: Многолучевое распространение: Влияние на результирующий сигнал

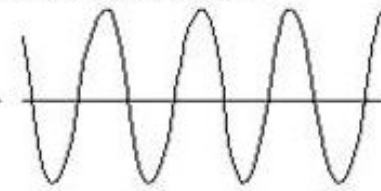
Векторная  
диаграмма



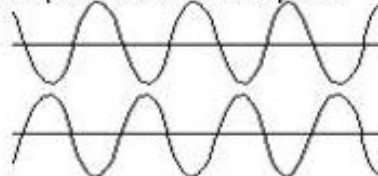
Прямые и отраженные сигналы  
на приемнике в фазе



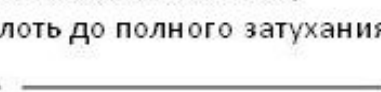
Положительная интерференция  
и усиление сигнала



Прямые и отраженные сигналы  
на приемнике НЕ в фазе



Отрицательная интерференция  
и ослабление сигнала,  
вплоть до полного затухания

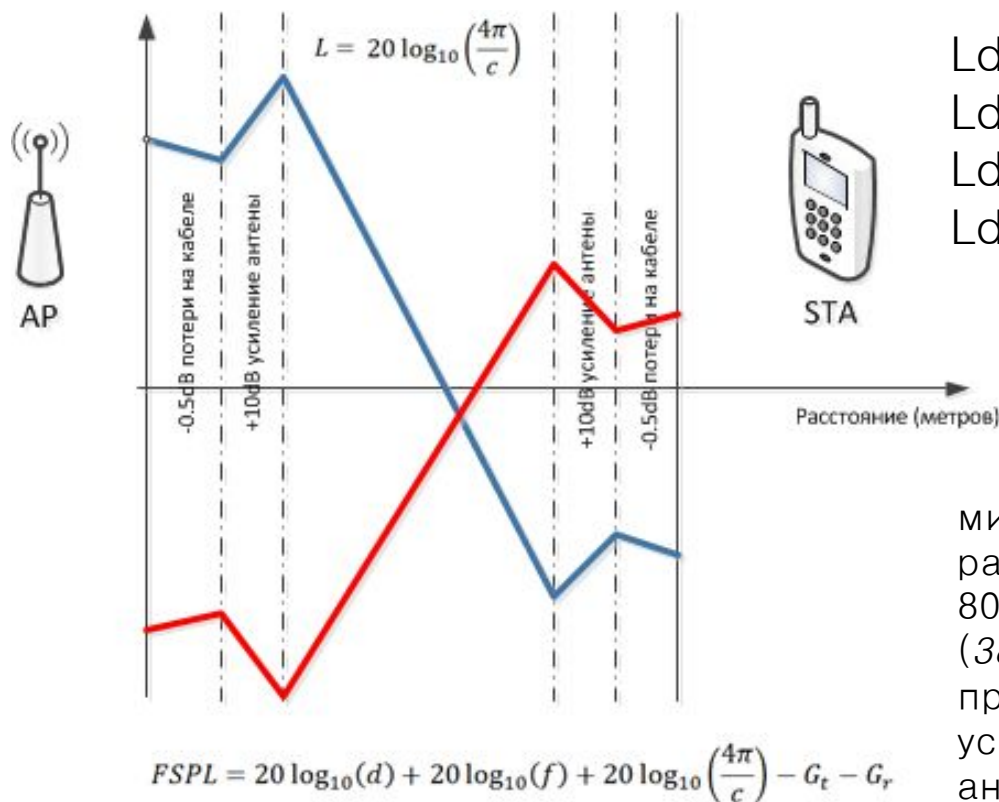


*Путем манипуляции фаз принятых сигналов  
мы можем искусственно создавать  
положительную интерференцию  
и усиливать результирующий сигнал.*

# Технологии Wi-Fi



## Особенности радиоканала: Бюджет мощности



LdB(2.4ГГц) = 80дБ трасса 100м  
LdB(5ГГц) = 87дБ трасса 100м  
LdB(60ГГц) = 88дБ трасса 10м  
LdB(60ГГц) = 108дБ трасса 100м

минимальный уровень сигнала для работы  
802.11ad на минимальной скорости (385Mbps PHY) равен **-68dBm**, что значит при передатчике в 10dB нужна усиливающая антенна ещё в 10dB для расстояния в 10 м.

# Технологии Wi-Fi



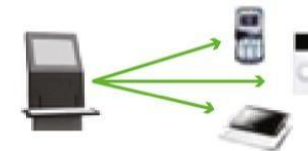
## Особенности использования 802.11ad

### Instant Wireless Sync

- IP-basierte P2P-Anwendungen
- Nutzung von I/O-PAL

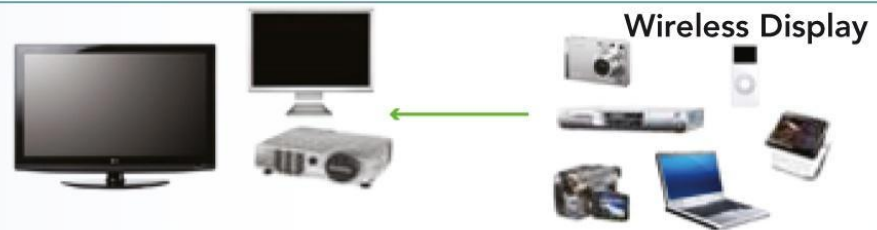


### Kiosk Sync & Data Exchange



### Wireless Display

- HD-Streaming über HDMI



### Cordless Computing

- Kombination von Wireless Displays und Synchronisation von Peripheriegeräten



### Distributed Peripherals



### Internet Access

- Klassisches WLAN mit 802.11ad als Internet-Zugang



# Технологии Wi-Fi

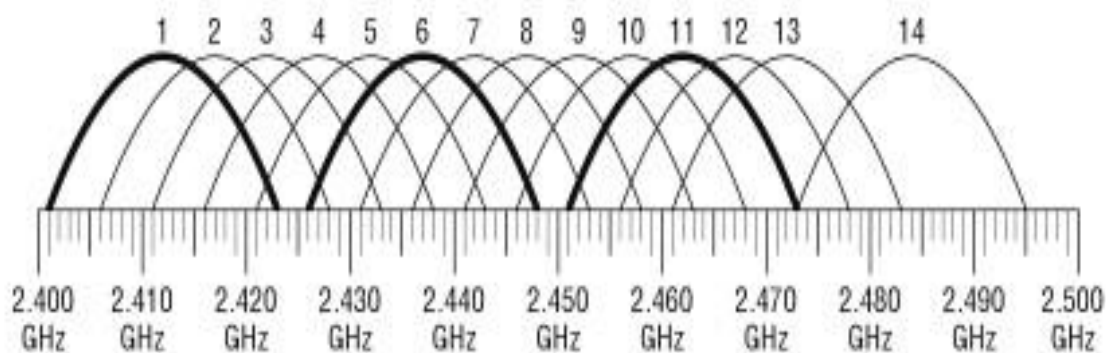


Зависимость скорости от отношения сигнал/шум (rate vs SNR)

	Rate (Mbps)	SNR (dB)
802.11b	1	4
DSSS	2	6
	5.5	8
	11	10
	6	5
802.11a/g OFDM	9	8
	12	10
	18	13
	24	16
	36	19
	48	22
	54	25

## Факторы, уменьшающие SNR

1. AP, работающие в неперекрывающихся каналах (1,6,11), интерференция
2. AP, работающие в смежном канале, уровень коллизий
3. Оборудование DECT
4. Оборудование Bluetooth
5. Микроволновое излучение



# Технологии Wi-Fi



Зависимость скорости от отношения сигнал/шум (rate vs SNR)

MCS Value Achieved by Clients at Various Signal to Noise Ratio Levels (SNR)

Protocol	Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
802.11b	20MHz	None	None	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 1	<b>Modulation Key</b> None = Grey BPSK = Red QPSK = Orange 16-QAM = Yellow 64-QAM = Blue 256-QAM = Green	
802.11a/g	20MHz	None	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 2	MCS 2	MCS 2	MCS 2	MCS 3	MCS 3		
802.11n	20MHz	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 2	MCS 2		
802.11n	40MHz	None	None	None	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1		
802.11ac	20MHz	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 2	MCS 2		
802.11ac	40MHz	None	None	None	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1		
802.11ac	80MHz	None	None	None	None	None	None	None	MCS 0	MCS 0	MCS 0		
802.11ac	160MHz	None	None	None	None	None	None	None	None	None	None		
SNR in dB		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
802.11b	20MHz	MCS 2	MCS 2	MCS 2	MCS 2	MCS 2	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3		<b>802.11 Type Key</b> 802.11b 802.11ag 802.11n 802.11ac
802.11a/g	20MHz	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 5	MCS 5	MCS 5	MCS 6	MCS 6	MCS 7		
802.11n	20MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 5	MCS 5	MCS 6		
802.11n	40MHz	MCS 1	MCS 2	MCS 2	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 4	MCS 4	MCS 4		
802.11ac	20MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 5	MCS 5	MCS 6		
802.11ac	40MHz	MCS 1	MCS 2	MCS 2	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 4	MCS 4	MCS 4		
802.11ac	80MHz	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 2	MCS 2	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3		
802.11ac	160MHz	MCS 0	MCS 0	MCS 0	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 1	MCS 2	MCS 2	MCS 3		



# Технологии Wi-Fi



Зависимость скорости от отношения сигнал/шум (rate vs SNR)

SNR in dB		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
802.11b	20MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3
802.11a/g	20MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	20MHz	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	40MHz	MCS 5	MCS 5	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11ac	20MHz	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 8	MCS 8
802.11ac	40MHz	MCS 5	MCS 5	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11ac	80MHz	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 5	MCS 5	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 6
802.11ac	160MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 4	MCS 4	MCS 4	MCS 5	MCS 5	MCS 6	MCS 6

SNR in dB		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
802.11b	20MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3
802.11a/g	20MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	20MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	40MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11ac	20MHz	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	40MHz	MCS 7	MCS 8	MCS 8	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	80MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 8	MCS 8	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	160MHz	MCS 6	MCS 6	MCS 6	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 8	MCS 8	MCS 9

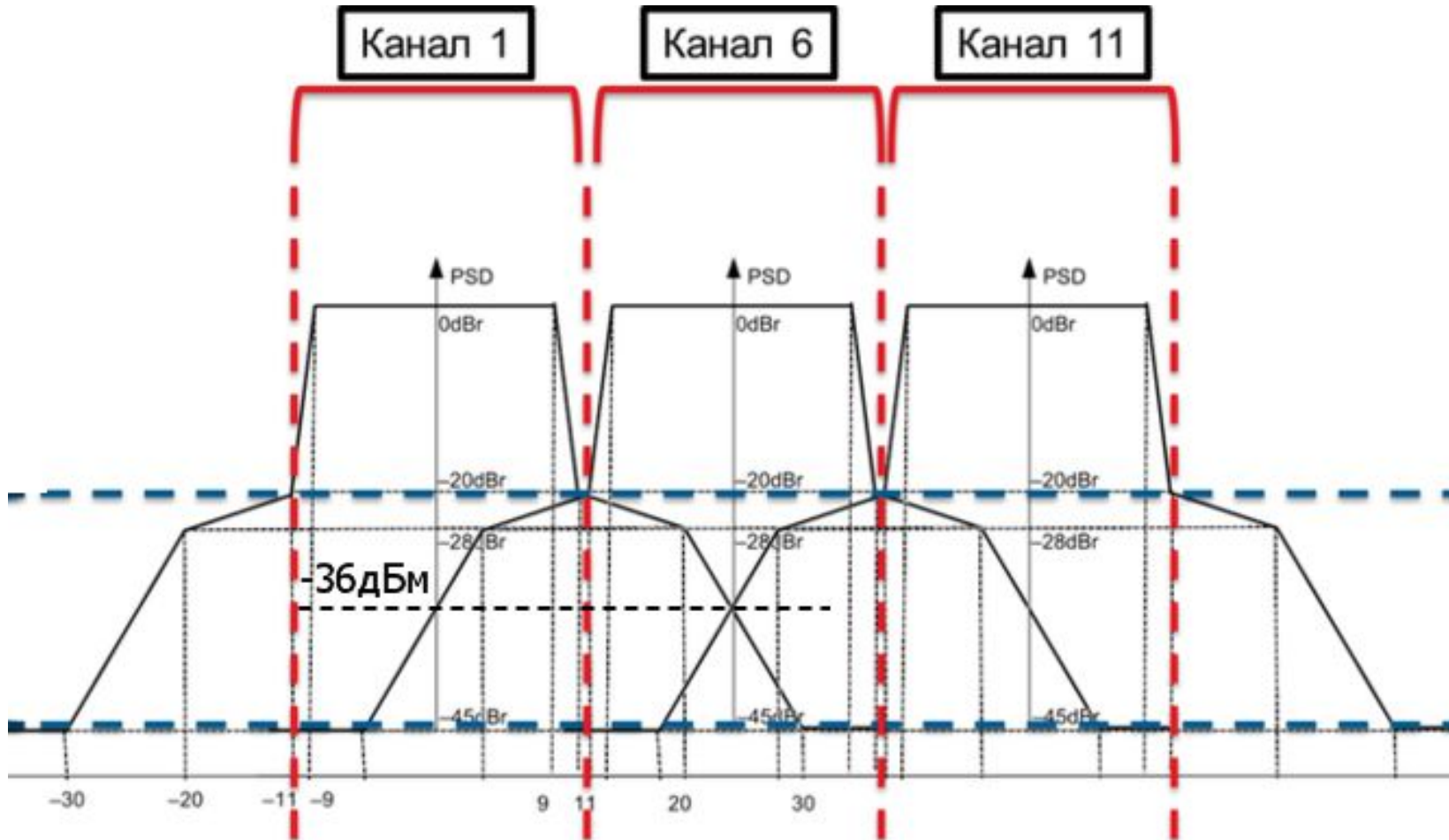
  

SNR in dB		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
802.11b	20MHz	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3	MCS 3
802.11a/g	20MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	20MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11n	40MHz	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7	MCS 7
802.11ac	20MHz	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	40MHz	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	80MHz	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9
802.11ac	160MHz	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9	MCS 9

# Технологии Wi-Fi



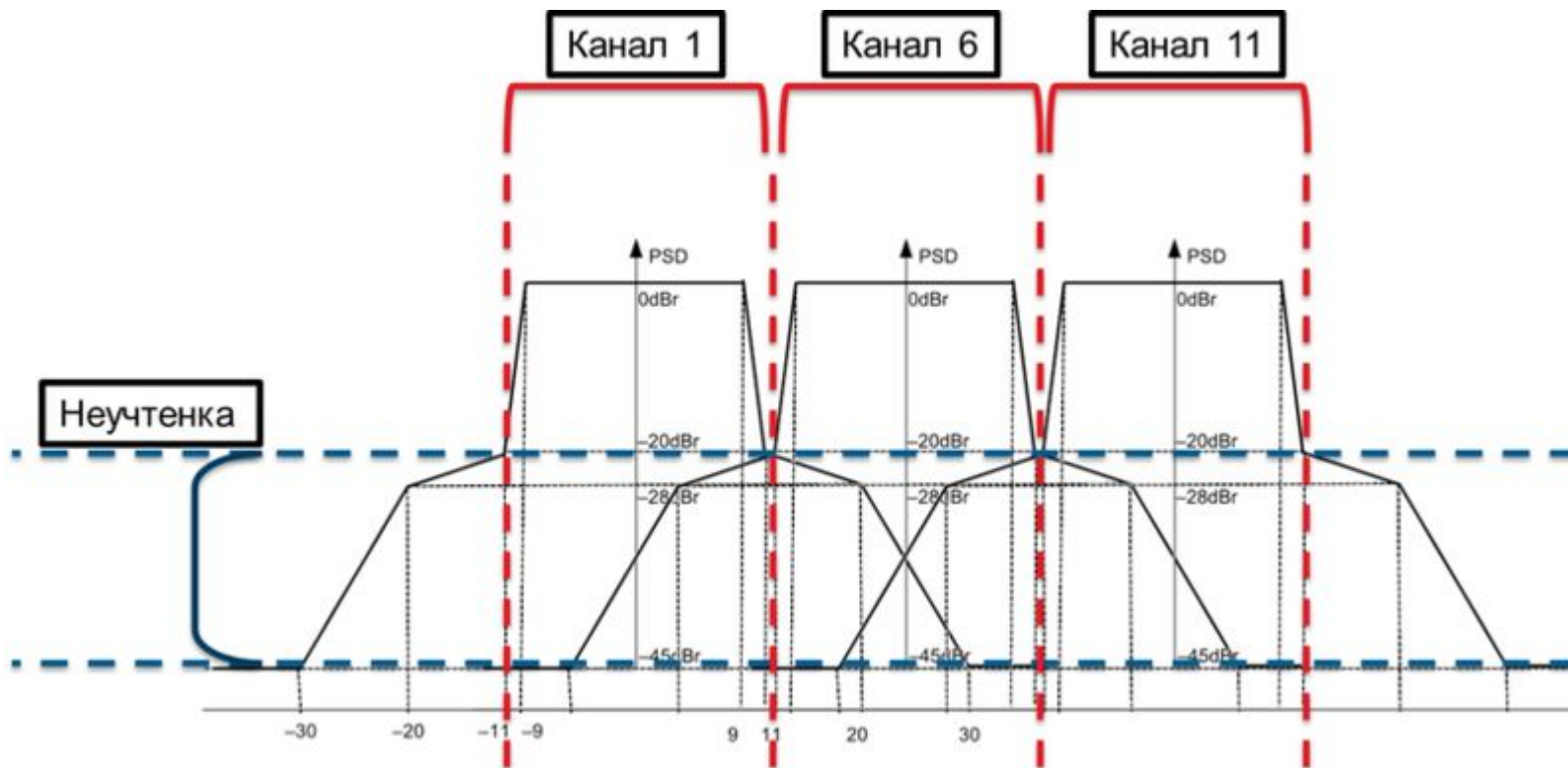
«Неперекрывающиеся» каналы



# Технологии Wi-Fi



## «Неперекрывающиеся» каналы



Все считают, что ширина канала — 22МГц (так и есть). Но, как показывает иллюстрация, сигнал на этом не заканчивается, и даже непересекающиеся каналы перекрываются: 1/6 и 6/11 — на  $\sim -20\text{dBm}$ , 1/11 — на  $\sim -36\text{dBm}$ , 1/13 — на  $-45\text{dBm}$ .

# Технологии Wi-Fi



Все ли каналы одинаковы с точки зрения клиента?

У большинства клиентских устройств мощность передатчика снижена на «крайних» каналах (1 и 11/13 для 2.4 ГГц). Вот пример для iPhone из [документации FCC](#) (мощность на порту антенны)

Channel	Frequency (MHz)	Power (dBm)
Low	2412	13.50
Middle	2437	17.00
High	2462	13.50

Причина в том, что Wi-Fi – связь широкополосная, удержать сигнал чётко в пределах рамки канала не удастся. Вот и приходится снижать мощность в «пограничных» случаях, чтобы не задевать соседние с ISM диапазоны.



## Особенности радиоканала: Адаптация скорости

Wi-Fi позволяет менять скорость при разном уровне сигнала:

- Высокий уровень – скорость увеличивается
- Низкий уровень – скорость уменьшается

Адаптация скорости реализуется за счет изменения:

- Количества используемых каналов
- «Ширины» используемых каналов
- Методов кодирования
- Интервала между сигналами (Guard Interval)

# Технологии Wi-Fi



## Особенности радиоканала: Адаптация скорости

Theoretical throughput for single Spatial Stream (in Mbit/s)										
MCS index	Modulation type	Coding rate	20 MHz channels		40 MHz channels		80 MHz channels		160 MHz channels	
			800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI
0	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65
1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
2	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
3	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
4	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
5	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520
6	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
7	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650
8	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
9	256-QAM	5/6	N/A	N/A	180	200	390	433.3	780	866.7

# Технологии Wi-Fi



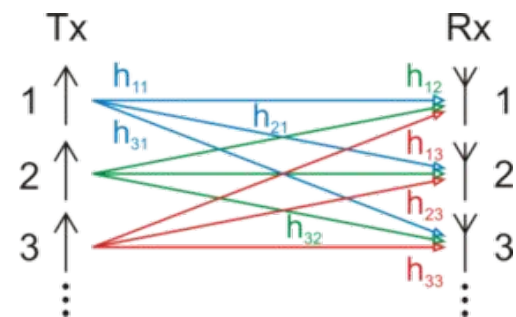
## Особенности радиоканала: Пространственный поток

Использование нескольких антенн для передачи и приема сигнала:

- Появилось в 802.11n, используется в 802.11ac
- Пространственный поток – сигнал, распространяющийся от одной антенны до другой
- Использование нескольких пространственных потоков позволяет увеличить скорость передачи данных

Multiple Input Multiple Output (MIMO):

- Метод кодирования сигнала для использования нескольких антенн





## Уровень MAC в Wi-Fi: коллизии

Wi-Fi использует разделяемую среду передачи данных

- Возможны коллизии

Задача уровня MAC в Wi-Fi:

- Обеспечить доступ к разделяемой среде только одного компьютера в каждый момент времени
- Безопасность передачи данных
- Передаваемый сигнал намного мощнее принимаемого
- Проблемы «Скрытой» и «засвеченной» станции
- Сигнал о коллизии может не дойти до всех компьютеров

Wi-Fi использует подтверждение доставки кадра:

- Обнаружение коллизий, по отсутствию подтверждения
- Обнаружение ошибок

При отсутствии подтверждения кадр пересылается повторно



# Технологии Wi-Fi



## Уровень MAC в Wi-Fi: коллизии

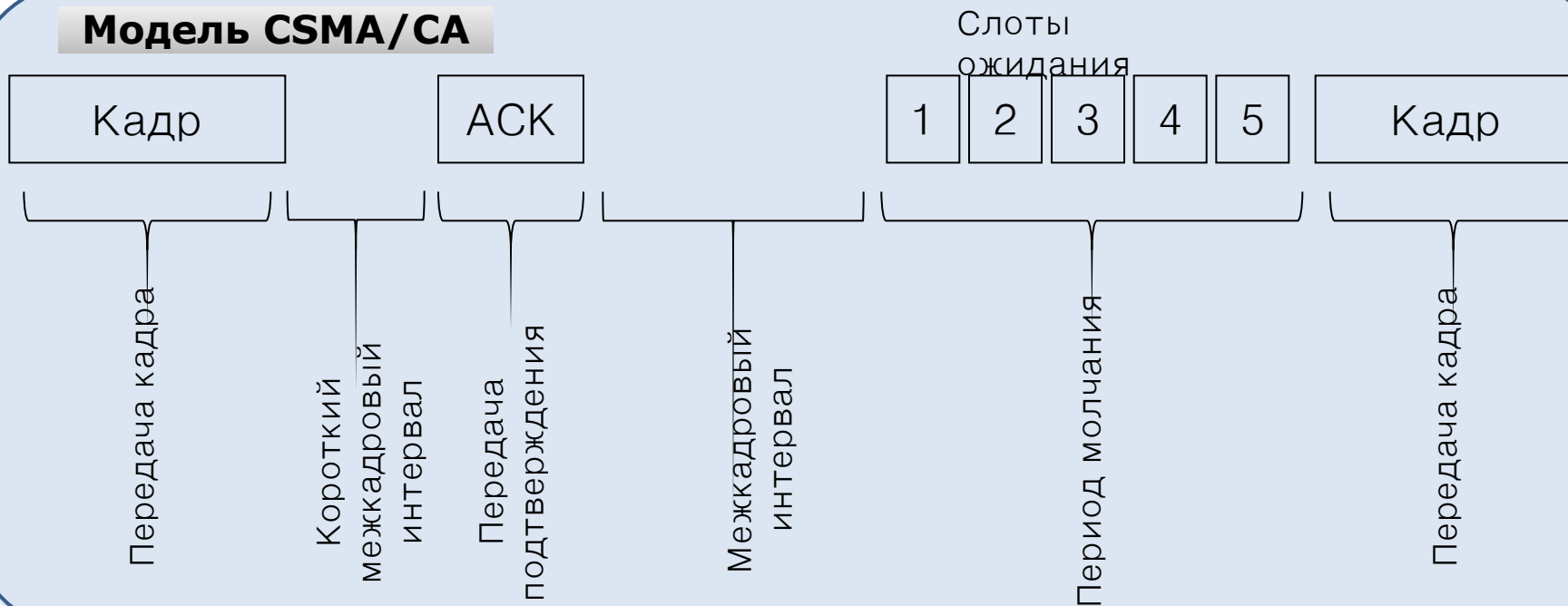
Метод доступа к среде в Ethernet:

- CSMA/CD - Множественный доступ с прослушиванием несущей частоты и распознаванием коллизий

Метод доступа к среде в Wi-Fi:

- CSMA/CA - Множественный доступ с прослушиванием несущей частоты с предотвращением коллизий

### Модель CSMA/CA



# Технологии Wi-Fi



## CSMA/CA

В Wi-Fi компьютеры прослушивают несущую чтобы определить, свободен ли канал

Если канал занят, компьютер устанавливает *таймер ожидания* = время резервации канала + период молчания

- Время резервации канала – время, необходимое на полную передачу сообщения: время передачи кадра + короткий межкадровый интервал + время передачи подтверждения
- Период молчания – сумма слотов ожидания

Кадры в Wi-Fi имеют приоритет:

- Определяет длительность межкадрового интервала
- Кадры с наивысшим приоритетом отправляются после короткого межкадрового интервала
- Кадры подтверждения (ACK) всегда имеют наивысший приоритет
- Длительность межкадрового интервала = короткий межкадровый интервал + 2\*слот ожидания

# Технологии Wi-Fi



## CSMA/CA

Слот ожидания – промежуток времени фиксированной длины

Количество слотов ожидания компьютеры выбирают случайным образом в промежутке от 0 до 31 и уменьшают выбранное число

	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n (2.4 ГГц)	802.11n (5 ГГц)	802.11ac	802.11ad
Короткий межкадровый интервал (мкс) SIFS	10	16	10	10	16	16	3
Слот ожидания (мкс)	20	9	9 или 20	9 или 20	9	9	1

# Технологии Wi-Fi



## CSMA/CA

Передача нового кадра начинается по истечении межкадрового интервала и достижении нулевого слота ожидания

Начинает передачу тот компьютер, который выбрал наименьшее число слотов ожидания

Компьютер передает кадр и ожидает подтверждения

Если подтверждение не пришло:

- Произошла ошибка
- Произошла коллизия

Производится повторная передача кадра

- Время ожидания увеличивается экспоненциально с каждой новой попыткой (как в Ethernet)



## Протокол MACA

Метод доступа CSMA/CA не решает проблему скрытой и засвеченной станции

- Теоретически это так
- На практике CSMA/CA почти всегда достаточно

Протокол Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)

- Предназначен для решения проблем скрытой и засвеченной станции
- Может использоваться в Wi-Fi (не обязательно)
- Применяется в основном в произвольном режиме (Ad-hoc)

Перед отправкой данных компьютер отправляет управляющее сообщение:

- Request To Send (RTS)
- Сообщение короткое, коллизий почти не бывает
- Включает размер сообщения с данными

Принимающий компьютер отвечает сообщением:

- Clear To Send (CTS)
- Также включает размер ожидаемого сообщения

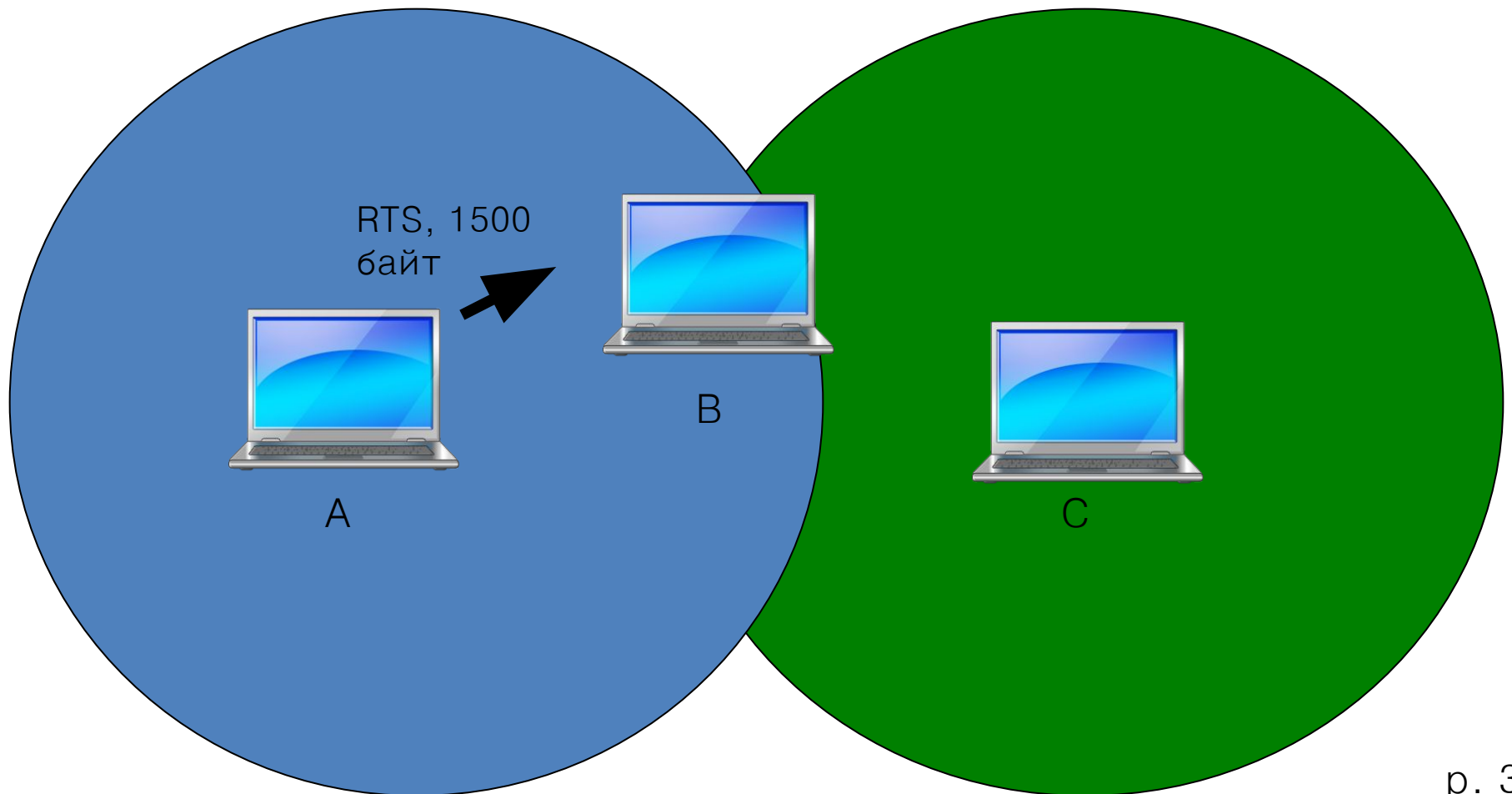
Компьютеры, увидевшее сообщение CTS ждут

- Время на передачу данных (размер данных в CTS)
- Время на передачу подтверждения

# Технологии Wi-Fi



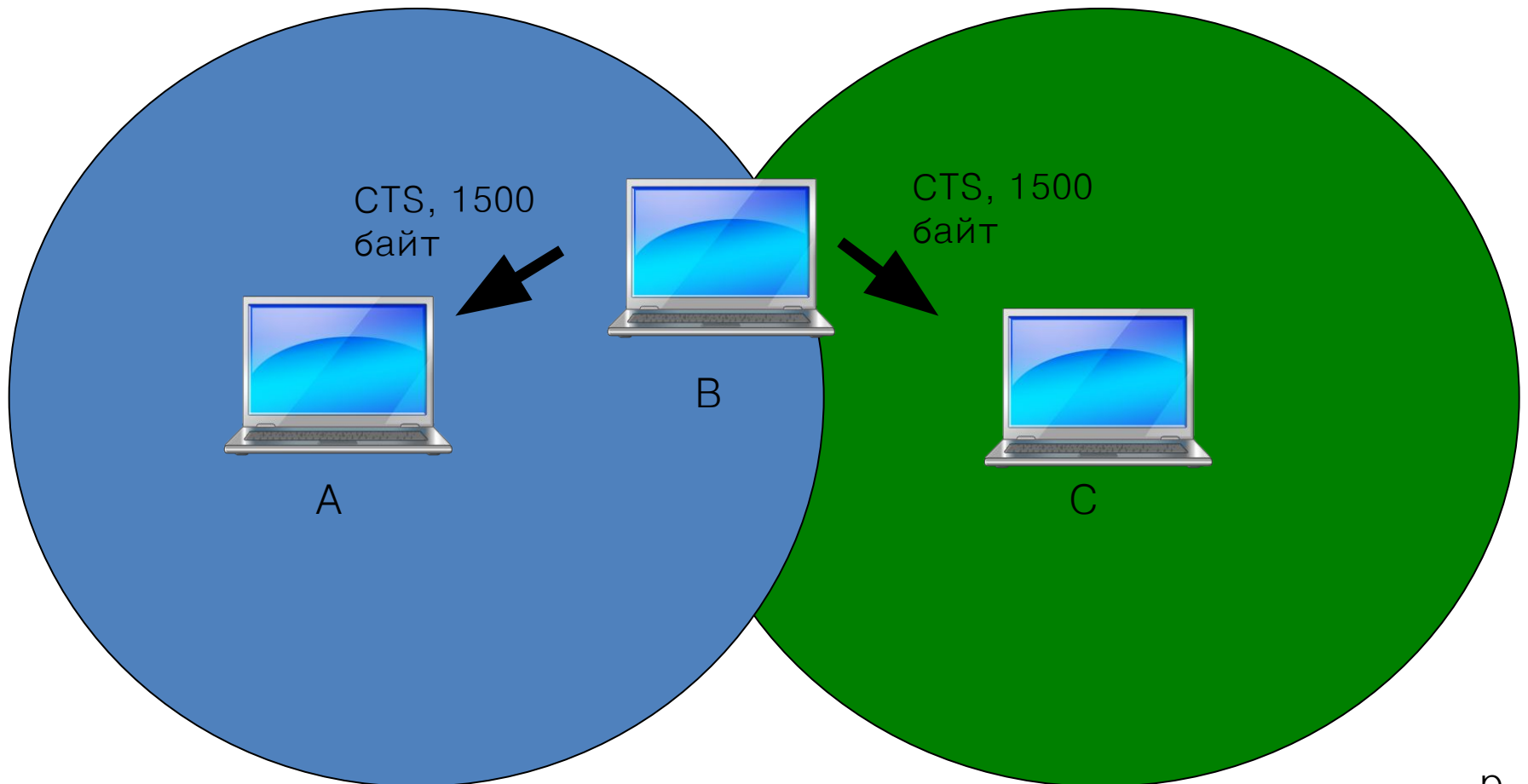
## Протокол MACA: скрытая станция



# Технологии Wi-Fi



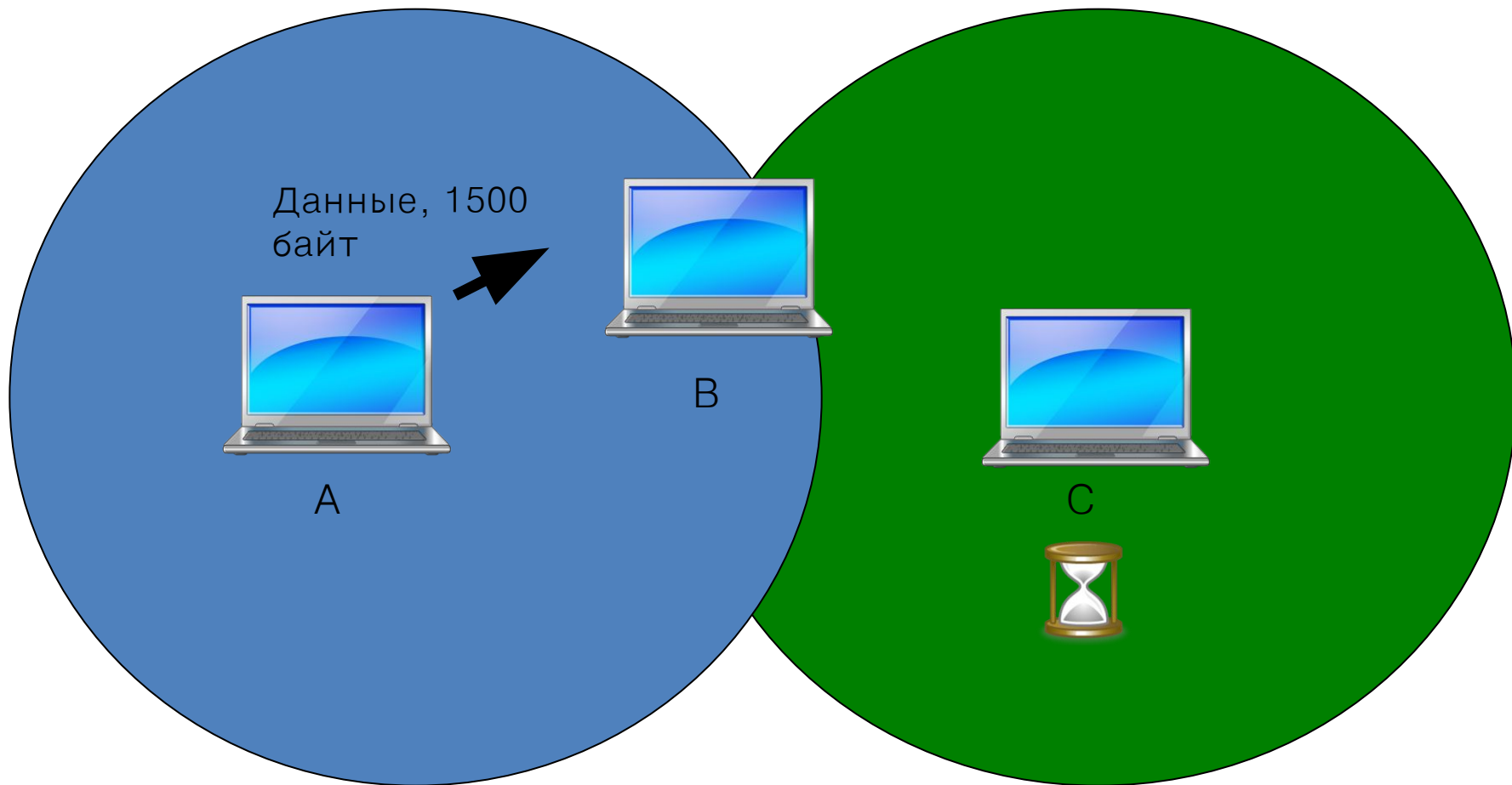
## Протокол МАСА: скрытая станция



# Технологии Wi-Fi



## Протокол МАСА: скрытая станция

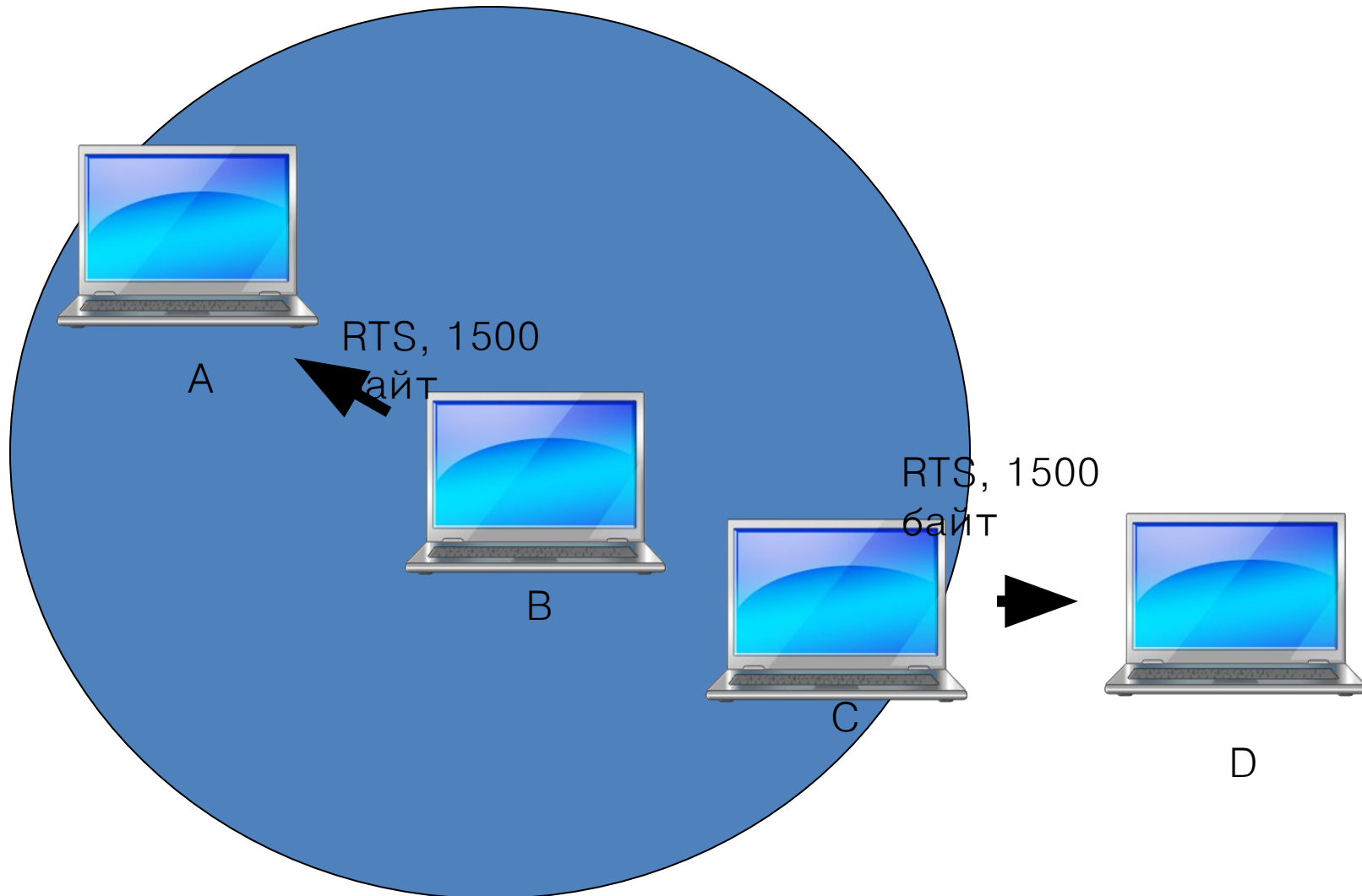




# Технологии Wi-Fi



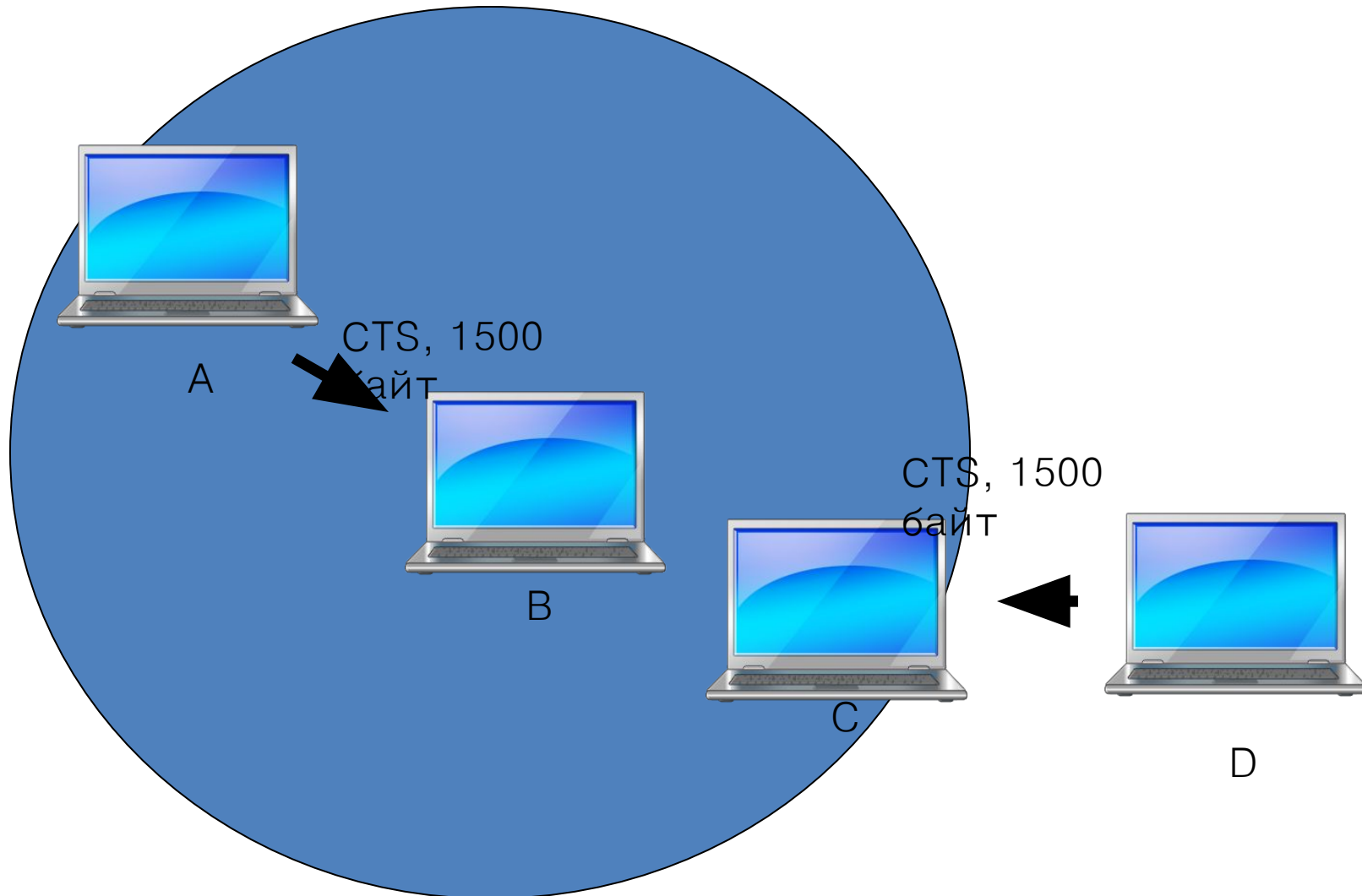
## Протокол MACA: засвеченная станция



# Технологии Wi-Fi



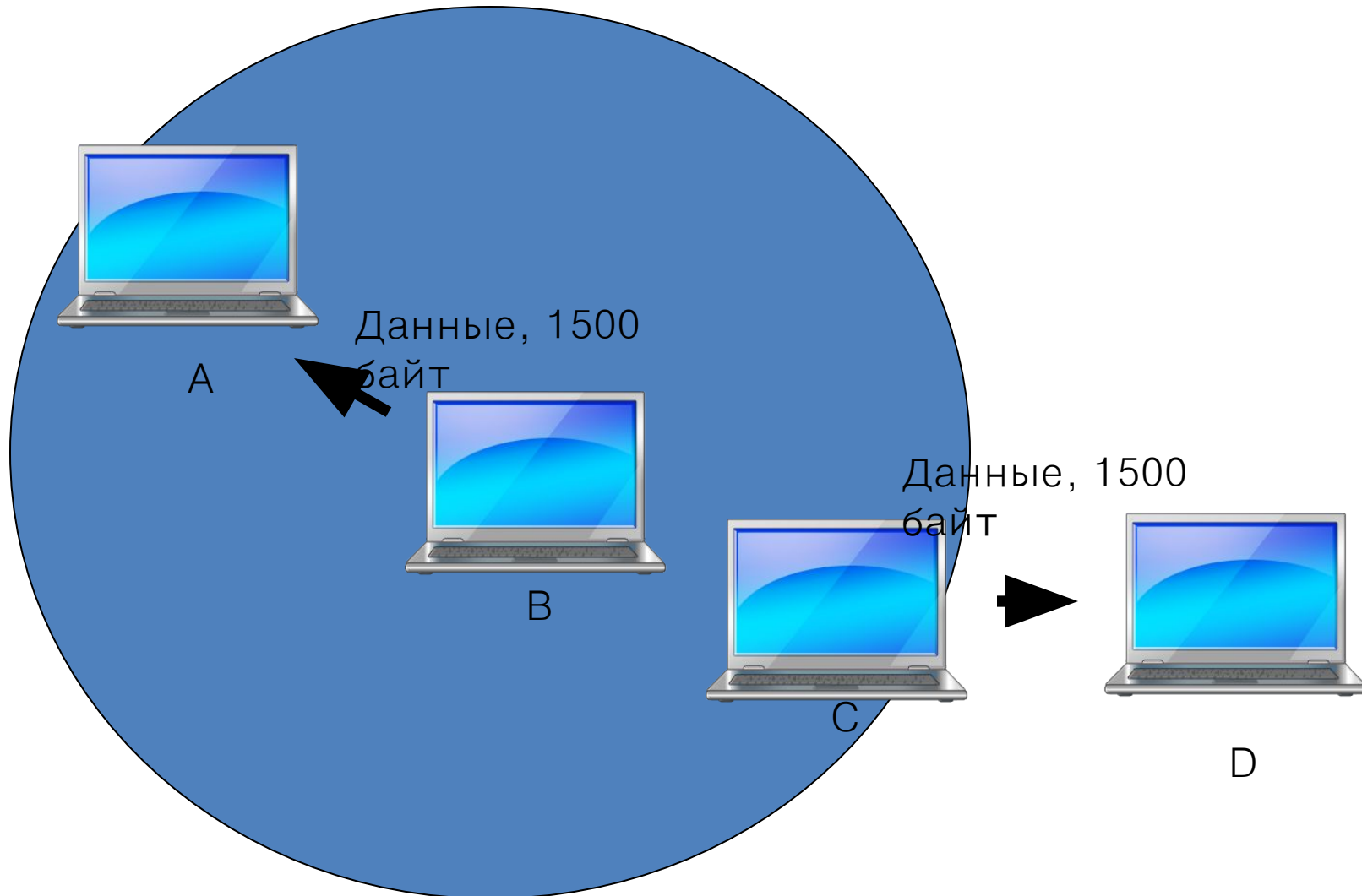
## Протокол MACA: засвеченная станция



# Технологии Wi-Fi



## Протокол MACA: засвеченная станция



# Технологии Wi-Fi



## Формат кадра Wi-Fi уровня MAC

2 байта	2 байта	6 байт	6 байт	6 байт	2 байта	6 байт	0-2304 байт	4 байта
Управление кадрами	Длительность	Адрес 1	Адрес 2	Адрес 3	Управление очередностью	Адрес 4	Тело кадра	Контрольная сумма

2 бита	2 бита	4 бита	1 бит	1 бит	1 бит	1 бит	1 бит	1 бит	1 бит	1 бит
Версия протокола	Тип	Подтип	To DS	From DS	MR	RT	Power Mgmt	MD	Protection Frame	Order

# Технологии Wi-Fi

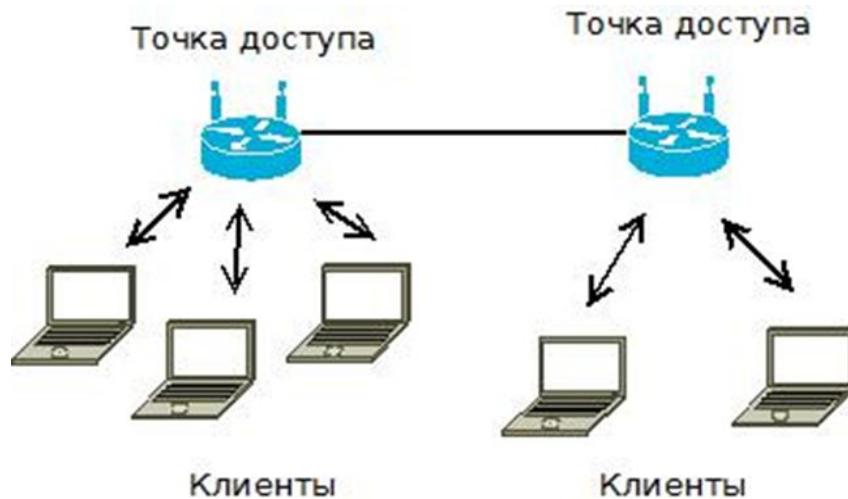


## Формат кадра Wi-Fi уровня MAC

Почему в кадре Wi-Fi четыре адреса?

Назначение адресов:

- Адрес отправителя
- Адрес получателя
- Адрес точки доступа отправителя
- Адрес точки доступа получателя



# Технологии Wi-Fi

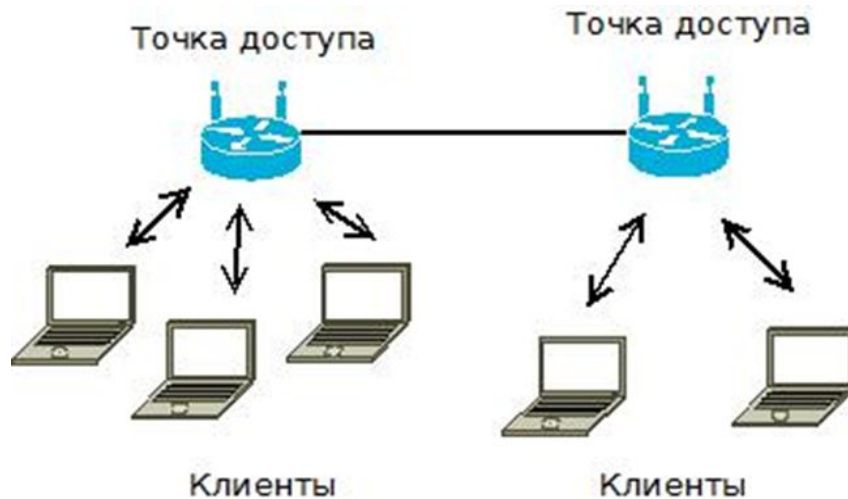


## Формат кадра Wi-Fi уровня MAC

Почему в кадре Wi-Fi четыре адреса?

Назначение адресов:

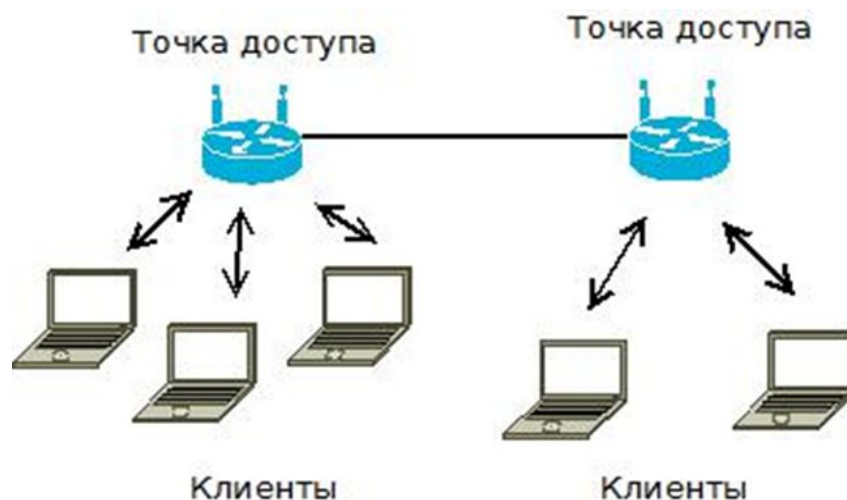
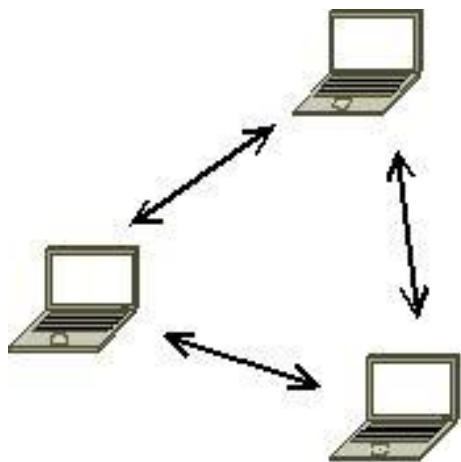
- Адрес отправителя
- Адрес получателя
- Адрес точки доступа отправителя
- Адрес точки доступа получателя



# Технологии Wi-Fi



## Адреса в кадре Wi-Fi



To DS	From DS	Адрес 1	Адрес 2	Адрес 3	Адрес 4
0	0	RA/DA	TA/SA	BSSID	n/a
0	1	RA/DA	TA/BSSID	SA	n/a
1	0	RA/BSSID	TA/SA	DA	n/a
1	1	RA	TA	DA	SA

- RA – Receiver address
- TA – Transmitter address
- DA – Destination address
- SA – Source address
- BSSID – идентификатор сети

# Технологии Wi-Fi



## Типы кадров Wi-Fi

Кадры данных

- Передача данных

Кадры контроля

- Управление передачей данных
- Примеры: RTS, CTS

Кадры управления

- Реализация сервисов Wi-Fi
- Примеры: ассоциация с точкой доступа

## Тело кадра Wi-Fi

Кадр данных

- Кадр формата LLC
- Максимальная длина 2304 байт (в Ethernet 1500 байт!)
- Может быть пустым (0 байт для кадра ACK)

Кадры контроля и управления

- Управляющая информация



# Технологии Wi-Fi



## Поле управления кадром

Версия протокола

- Версия протокола 802.11

Тип кадра

- Данных, контроля, управления

Подтип кадра

- Какой именно кадр заданного типа

К DS/ От DS (к/от распределительной системы)

- Направление движения кадра при инфраструктурном режиме работы

RT (ReTransmission) – признак повторной передачи кадра

# Технологии Wi-Fi



## Фрагментация кадров в Wi-Fi

Ошибки при передаче случаются часто

- 1 ошибка на 1000 байт

Можно ли передавать данные? Да, можно!

- Длинные кадры нужно разбить на фрагменты менее 1000 байт
- Скорость упадет, но данные будут передаваться

Схема работы:

- Отправитель разбивает большой кадр на маленькие фрагменты
- Каждый фрагмент передается по сети отдельно
- Получатель записывает фрагменты в буфер
- Из фрагментов в буфере собирается один большой кадр

Флаг MF в поле «Управление кадром»

- More Fragments (еще фрагменты)
- Признак использования фрагментации
- Фрагменты большого кадра передаются с установленным флагом MF
- Последний фрагмент передается без этого флага

Поле «Управление очередностью» кадра уровня MAC

- Sequence Control (управление последовательностью/очередностью)
- Номер фрагмента

# Технологии Wi-Fi



## Управление питанием

Wi-Fi часто используется в мобильных устройствах

- Очень важно экономить электроэнергию чтобы продлить срок работы батареи

Стандарт IEEE 802.11 PSM

- Режимы работы станции: активный и спящий
- В спящем режиме станция не принимает и не передает данные
- Точка доступа записывает кадры для «спящей» станции в буфер
- «Спящая» станция регулярно просыпается и читает все кадры от точки доступа
- Передавать кадры станция может в любое время

Флаг PM

- Power Management (управление питанием)
- Показывает, в каком режиме находится станция

Флаг MD

- More Data (больше данных)
- Сигнализирует, что есть еще кадры для получения

# Технологии Wi-Fi



## Безопасность Wi-Fi

Wi-Fi использует электромагнитное излучение для передачи данных:

- Данные доступны всем

Защита данных встроена в Wi-Fi

- Шифрование
- Флаг Protection Frame в заголовке кадра
- Шифруются только данные, заголовки 802.11 передаются в открытом виде

Wired Equivalent Privacy (WEP) – первоначальная схема, высокая уязвимость

- Выпущен в 1999, первая атака опубликована в 2001

Wi-Fi Protected Access (WPA) – временная улучшенная схема

- Выпущен в 2003

Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2):

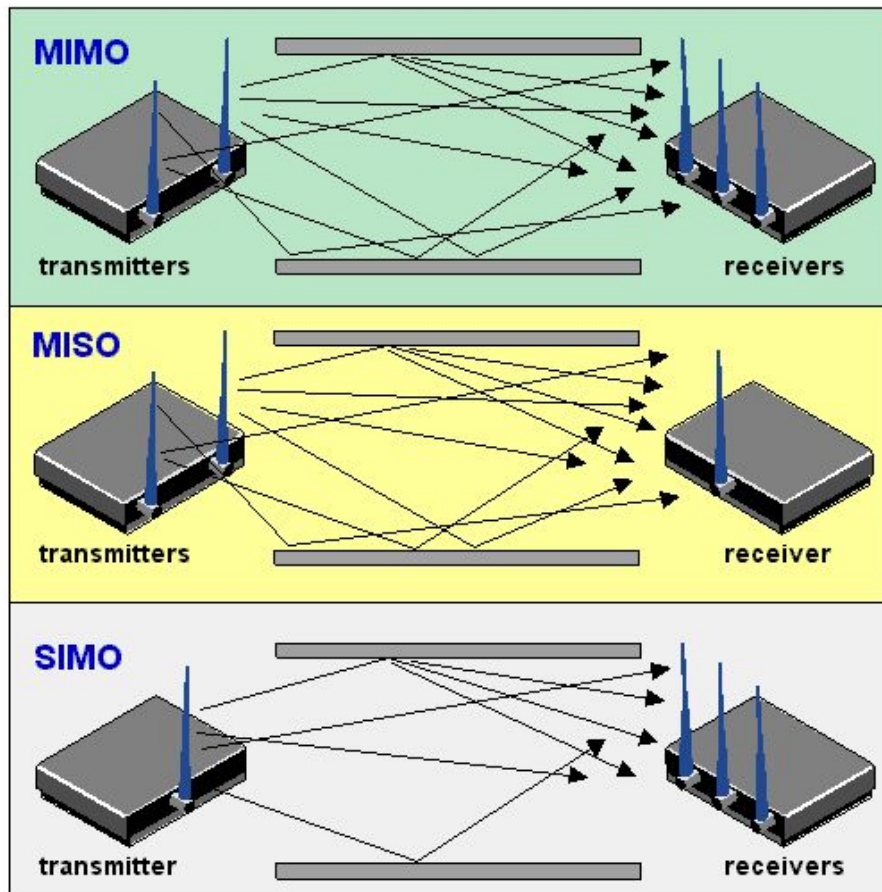
- Выпущен в 2004
- Используется сейчас
- Стандарт 802.11i
- Шифрование на основе AES (Advanced Encryption Standard)

# Технологии Wi-Fi



**MIMO – Multiple Inputs / Multiple Outputs**

**множественные входы / множественные выходы**



# Технологии Wi-Fi



## MIMO – Multiple Inputs / Multiple Outputs: различные варианты

MIMO: Multiple Input Multiple Output  
MISO: Multiple Input Single Output  
SISO: Single Input Single Output



# Технологии Wi-Fi



## MIMO – Multiple Inputs / Multiple Outputs: различные варианты

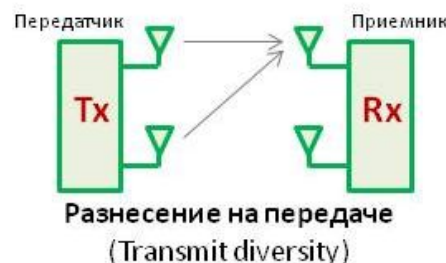
### Разнесение при Получении сигнала

При наличии как минимум двух приемников с разнесенными антеннами появляется возможность выбора лучших из принятых прямых и переотраженных сигналов, а также их комбинирования на приеме



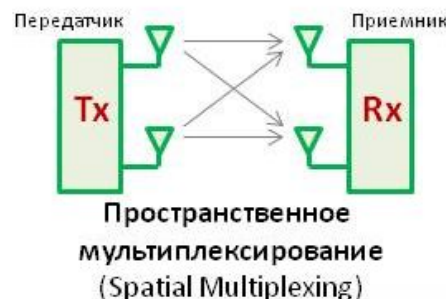
### Разнесение при Отправке сигнала

При наличии как минимум двух передатчиков с разнесенными антеннами появляется возможность отправки группы идентичных сигналов для увеличения количества копий информации и повышения надежности на передаче.



### Пространственное мультиплексирование сигналов (объединение сигналов)

При наличии как минимум двух передатчиков и приемников с разнесенными антеннами появляется возможность отправки группы различных сигналов для реализации возможности объединения этих сигналов на приемнике и соответствующего увеличения полосы пропускания

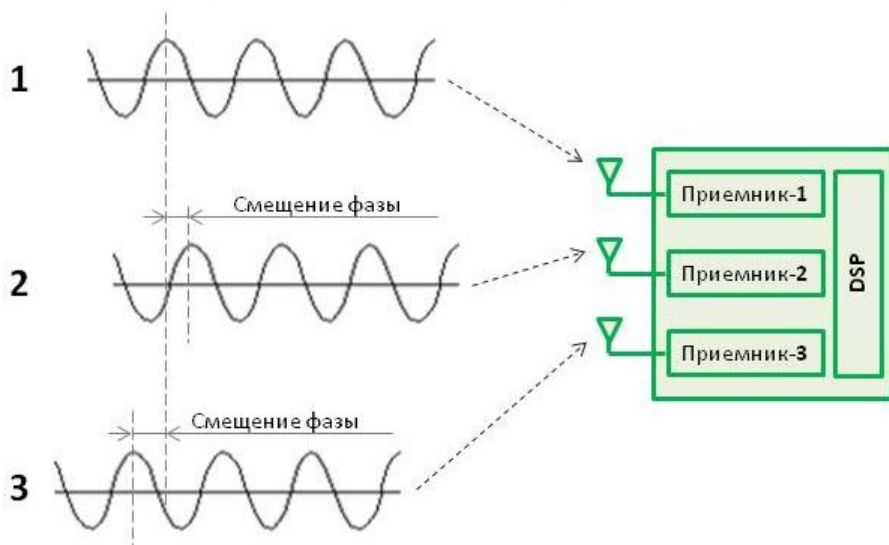


# Технологии Wi-Fi

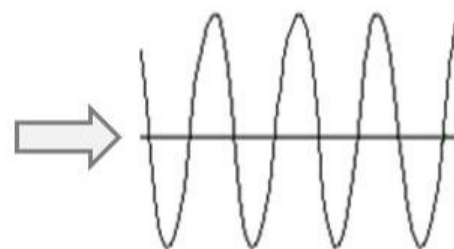


**MIMO:** Технология MRC – maximum ratio combining направлена на подъем уровня сигнала в направлении от Wi-Fi клиента к Точке Доступа WiFi

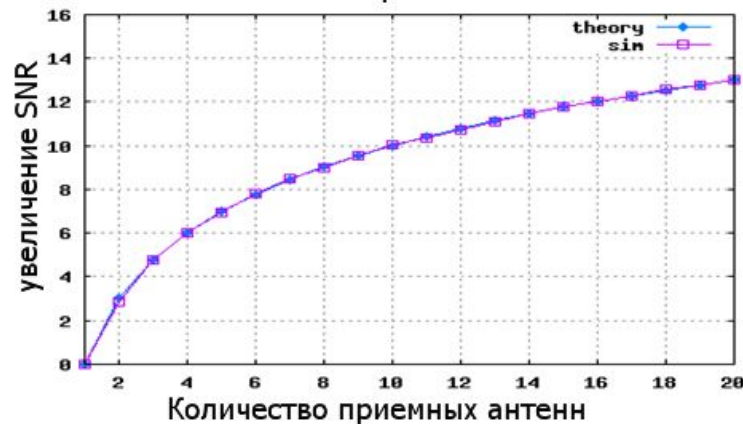
Сигналы на приемниках Точки Доступа



Итоговый сигнал после обработки



Влияние количества приемных антенн на SNR





# Технологии Wi-Fi

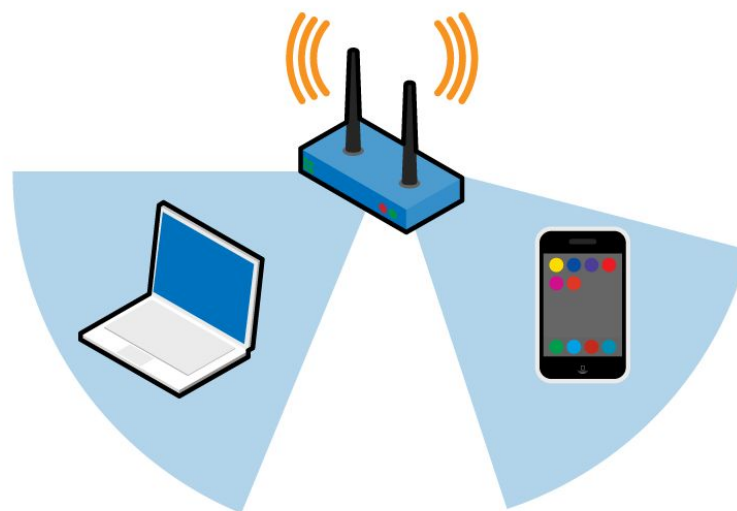


**MIMO: Технология Transmit beamforming  
управление диаграммой направленности ДН**

(a) Spatial reuse per AP



(b) Spatial reuse per receiver



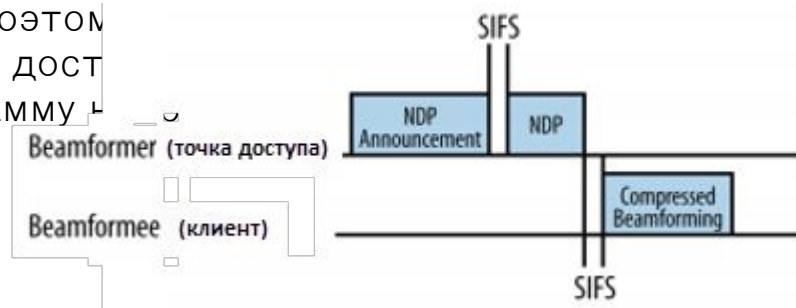
# Технологии Wi-Fi



## MIMO: Технология Transmit beamforming управление диаграммой направленности ДН

Процесс калибровки выглядит следующим образом:

1. Точка доступа формирует и отправляет специализированный кадр (Null Data Packet Announcement – NDPA) для оповещения клиента. В нем содержится информация о количестве передатчиков, количестве потоков и другие сопутствующие данные.
2. Далее клиенту отправляется Null Data Packet (NDP). Это делается для того, чтобы клиент, анализируя информацию в заголовках на физическом уровне, смог сформировать отчет о полученном сигнале и отправить его обратно точке доступа.
3. Клиент анализирует полученный (на всех антеннах) сигнал по каждой поднесущей и формирует матрицу направленности с определенной амплитудой и фазой. Данная матрица занимает достаточно большой объем (особенно с учетом ширины каналов в 11ac), поэтому
4. Получатель (точка доступа) формирует диаграмму



информации

# Технологии Wi-Fi



## **MIMO: Технология Transmit beamforming управление диаграммой направленности ДН**

Формирование диаграммы направленности происходит следующим образом: каждая антенная начинает передавать некую суперпозицию всех пространственных потоков с определёнными коэффициентами (фаза, амплитуда). Причём коэффициенты для каждого потока на каждой антенне будут свои.

Стоит обратить внимание, что реальный выигрыш от технологии формирования диаграммы направленности мы получаем только в том случае, если количество антенн на передачу у нас превосходит количество передаваемых пространственных потоков.

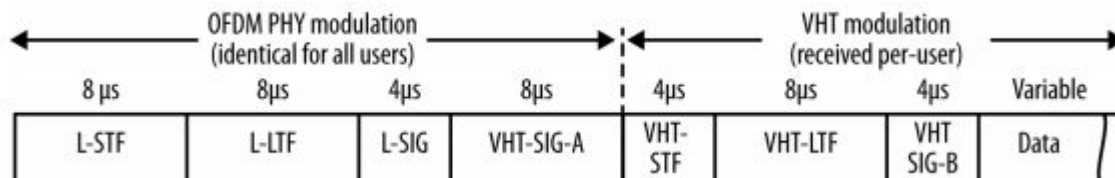
Для многопользовательской передачи (multi-user beamforming), процесс схожий, однако калибровка происходит для каждого

# Технологии Wi-Fi

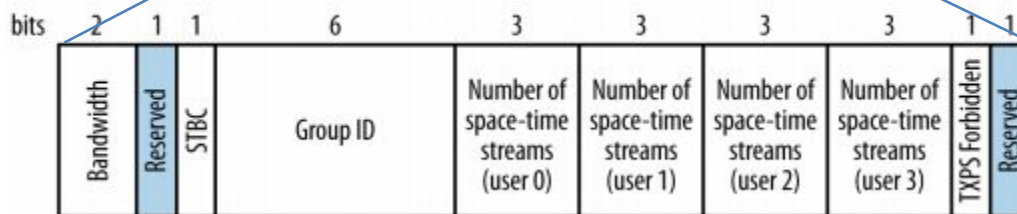


## MIMO: Технология Transmit beamforming управление диаграммой направленности ДН

Для реализации данной функции потребовалось изменить формат кадра на физическом уровне, добавив специализированные заголовки для согласования параметров с несколькими пользователями. Кроме того, появилось разделение кадра на получателей (кадр адресованный всем, кадр для конкретного клиента)



(a) VHT-SIG-A1

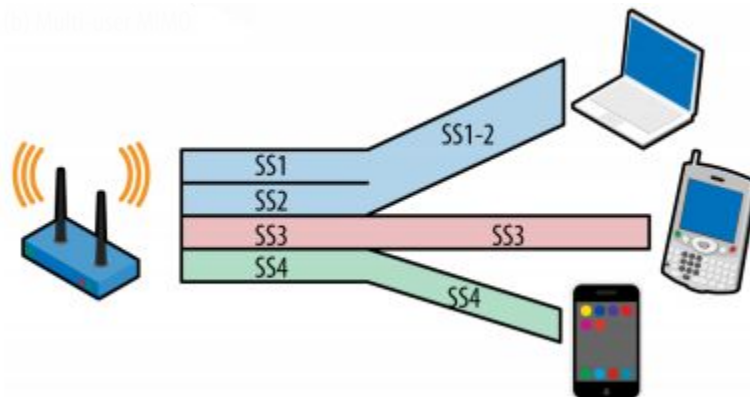


# Технологии Wi-Fi



## MIMO: Технология Transmit beamforming управление диаграммой направленности ДН

Для предотвращения интерференции передаваемого сигнала при многопользовательской передаче, диаграмма направленности для каждого клиента строится таким образом, что сигнал для соседних клиентов не



# Технологии Wi-Fi

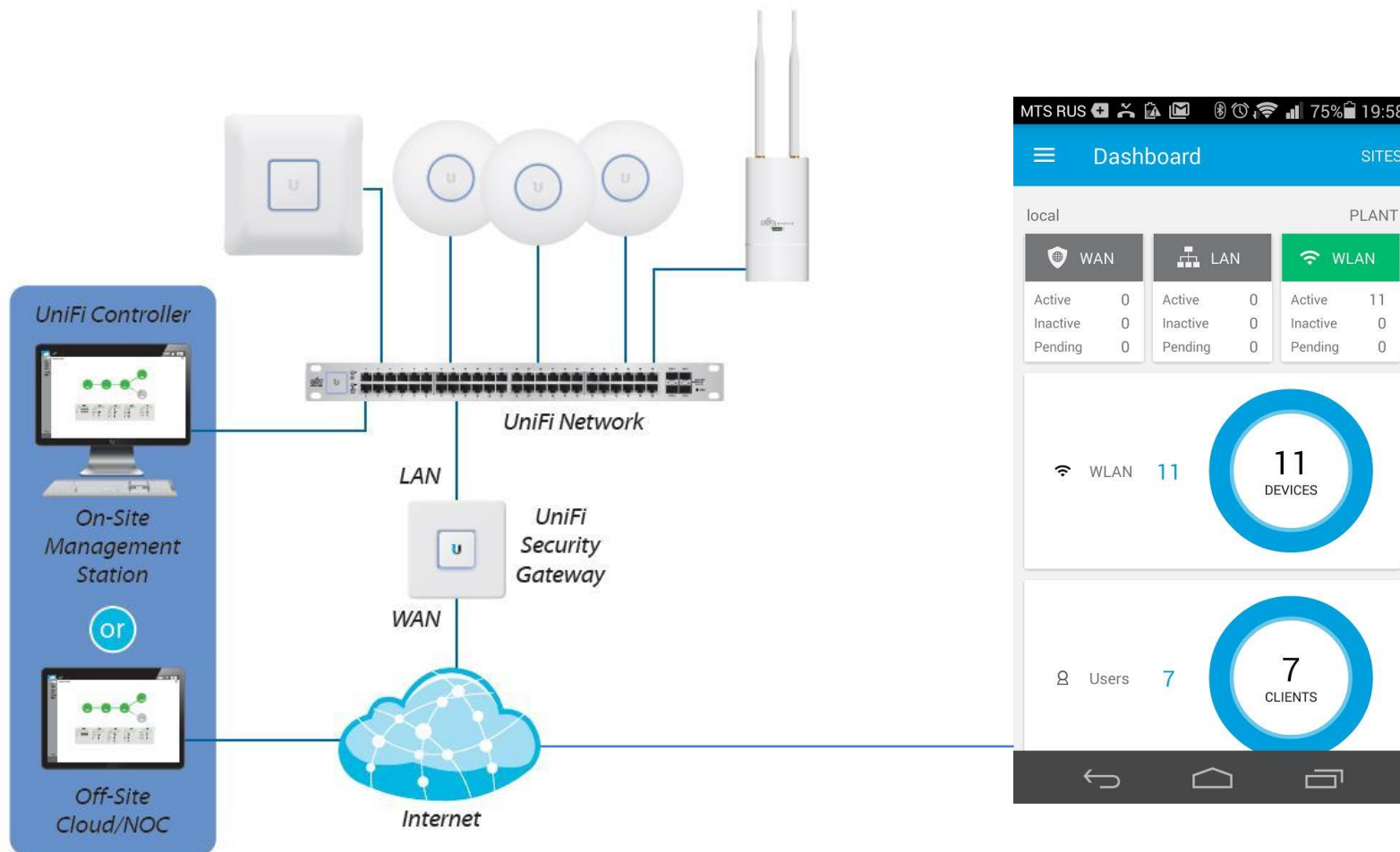


## Администрирование сетей Wi-Fi: Контроллеры Wi-Fi + AP's

Домашний Wi-Fi	Корпоративный Wi-Fi
<p>Требования к безопасности стандартные, «цена» передаваемых данных обычно очень низкая. То есть даже если злоумышленник сможет взломать защиту (а значит она была плохо настроена) — ничего важного и конфиденциального он не сможет перехватить.</p>	<p>Высокие требования к безопасности — беспроводная сеть должна быть столь же безопасной, что и проводная сеть предприятия. Понятно, пассивной защитой точек доступа система безопасности не ограничивается. Защита должна быть активной и превентивной.</p>
<p>Все управление сводится к настройке одной точки доступа. Какой-то внешней системы не нужно.</p>	<p>Точек доступа десятки или даже сотни. Нужно:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• обновлять ПО;</li><li>• вносить изменения в настройки нескольких или всех точек;</li><li>• отслеживать — все ли точки «легальные»;</li><li>• иметь возможность визуально планировать радиопокрытие здания;</li><li>• мониторить местоположение пользователей в здании;</li><li>• помимо корпоративного доступа предоставлять гостевой — быстро и удобно;</li><li>• и многое другое...</li></ul> <p>Понятно, что такое возможно только при централизованном управлении всеми точками доступа. Для этого и служит контроллер.</p>
<p>Бесшовного роуминга между точками доступа нет — да и не нужен он — точка-то одна.</p>	<p>Роуминг желателен. Чтобы абонент, перемещаясь внутри офиса, не чувствовал переключения между точками доступа. Хотя часто ли в офисе сотрудники работают на ходу?</p>

# Технологии Wi-Fi

## Администрирование сетей Wi-Fi: SDN Контроллеры Wi-Fi



# Технологии Wi-Fi



## Администрирование сетей Wi-Fi: SDN Контроллеры Wi-Fi



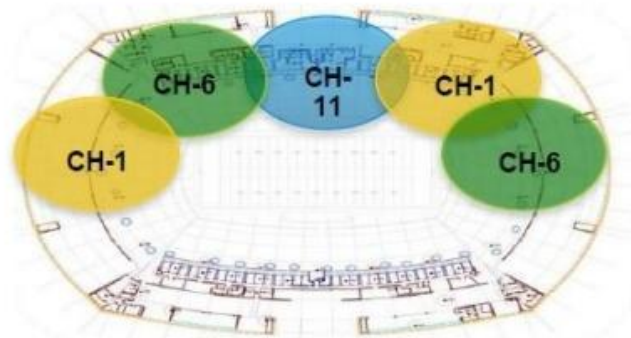


# Технологии Wi-Fi



## High Density Wi-Fi - Wi-Fi высокой плотности

Применение патч-антенн секторной направленности для повышения плотности подключений



**До**

Широкие ячейки с низкой плотностью



**После**

Покрытие с высокой плотностью подключений

- Меньшие ячейки позволяют устройствам работать на более высоких скоростях
- Больше ячеек = Больше плотности (= скорости = клиентов)

# Технологии Wi-Fi



## High Density Wi-Fi - Wi-Fi высокой плотности

