



# Wi-Fi. Физика процесса

Спикер: Игорь Якушев

инженер сервисного  
центра Wireless & Systems



# Что вы сегодня узнаете?



Из чего состоит устройство



Появление Wi-Fi сигнала, его преобразование и распространение в эфире



Частотные каналы



Модуляции



Что появилось раньше – А или В?



Что есть МКС, и с чем его едят



Как работает Wi-Fi?



Фичи AX

# Состав устройства



# Состав устройства



Flash

PHY

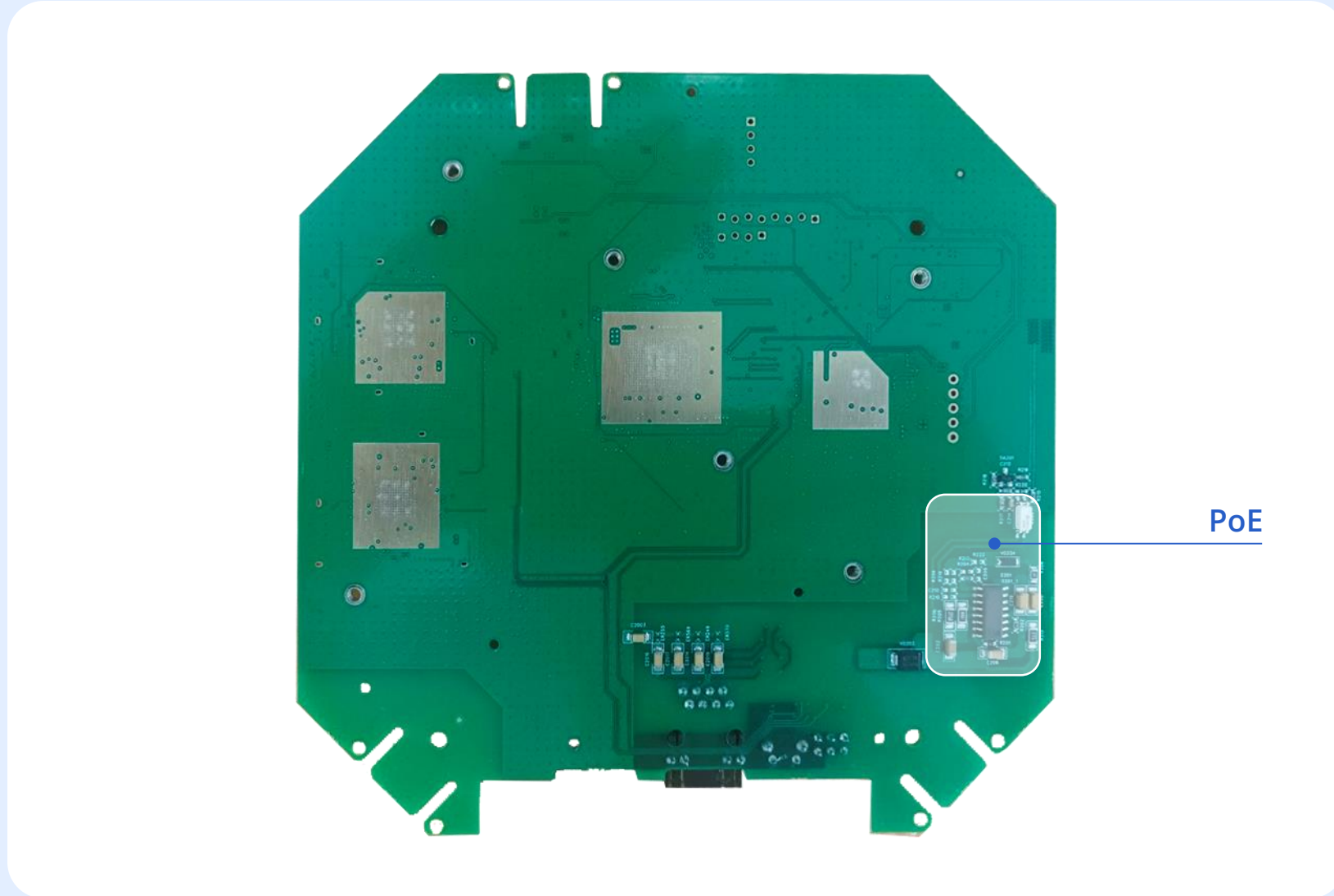
CPU

Wi-Fi 2.4G

Wi-Fi 5G

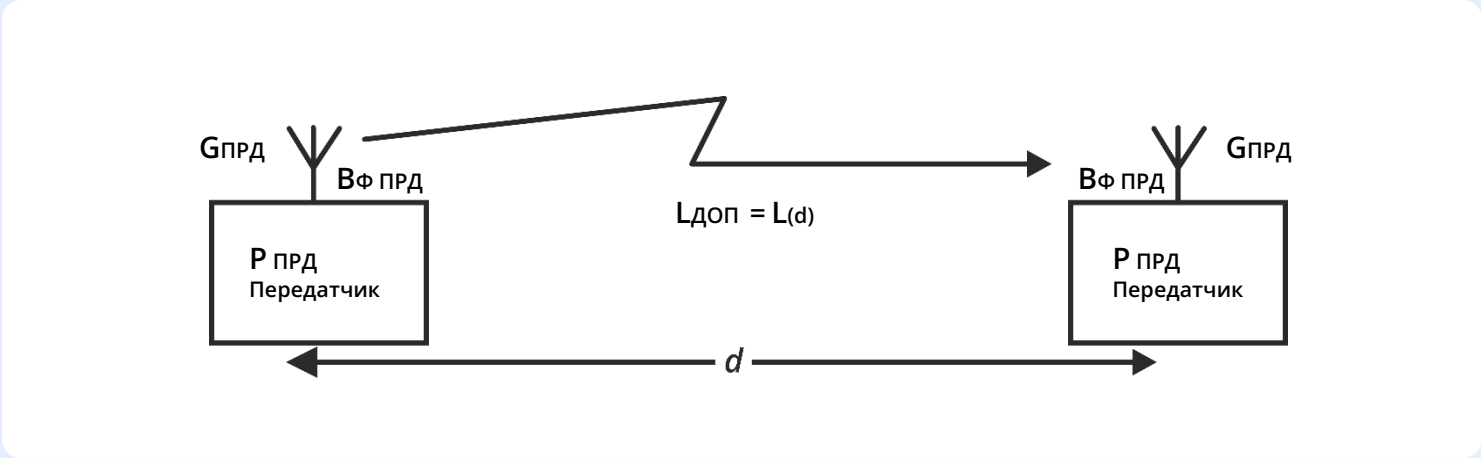
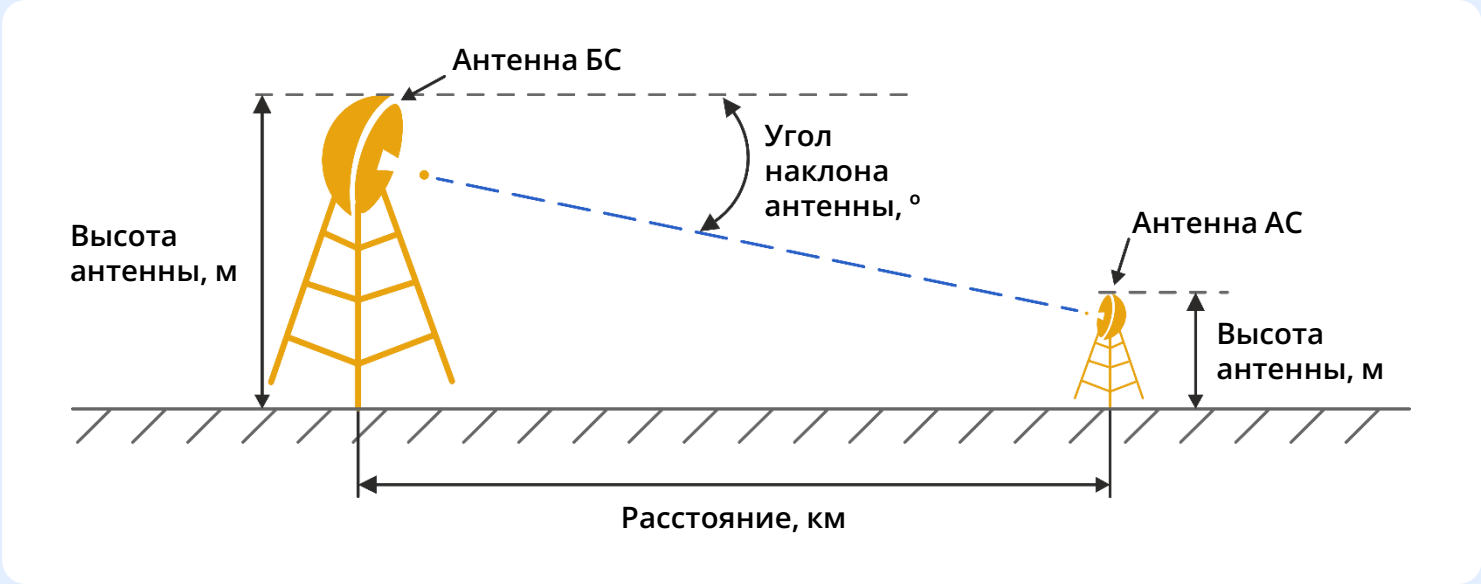


# Состав устройства



PoE

# Распространение сигнала



# Формулы



**EIRP (ЭИИМ) - эффективная изотропно излучаемая мощность**

$$P_{\text{ИЗЛ}} = P_{\text{ПРД}} - B_{\Phi \text{ ПРД}} + G_{\text{ПРД}}$$

**Уровень сигнала на приеме**

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПРМ}} + B_{\Phi \text{ ПРМ}} - G_{\text{ПРМ}}$$

**Затухание сигнала**

$$L_{\text{ДОП}} = P_{\text{ИЗЛ}} - P_{\text{ПР}}$$

**Перевод мощности из мВт в дБм**

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \lg P_{\text{мВт}}$$





**EIRP (ЭИИМ) - эффективная изотропно излучаемая мощность**

$$P_{\text{ИЗЛ}} = 23 \text{ дБм} (200 \text{ мВт}) - 3 \text{ дБ} + 10 \text{ дБи} = 30 \text{ дБм}$$

**Уровень сигнала на приеме**

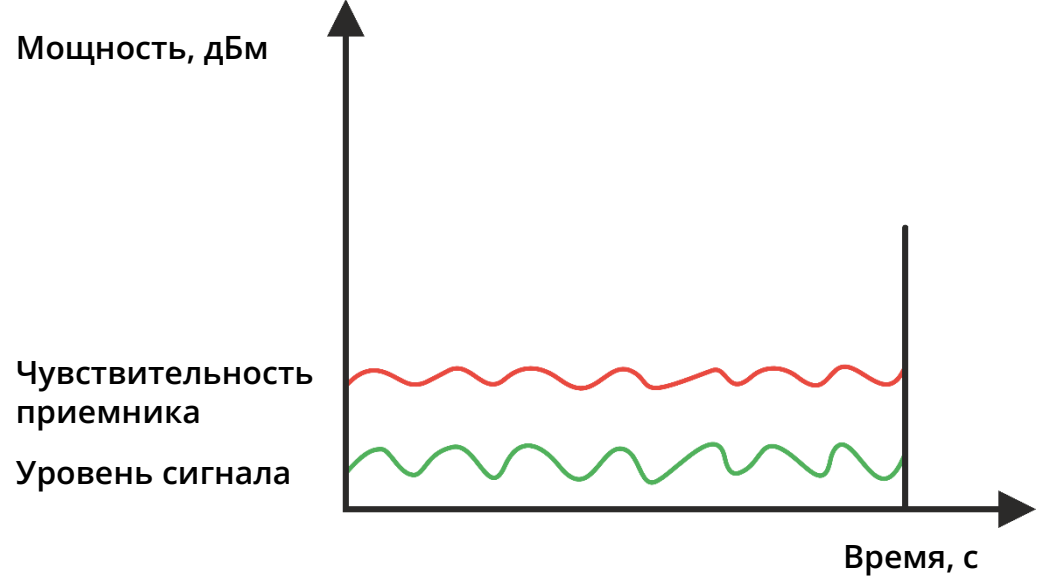
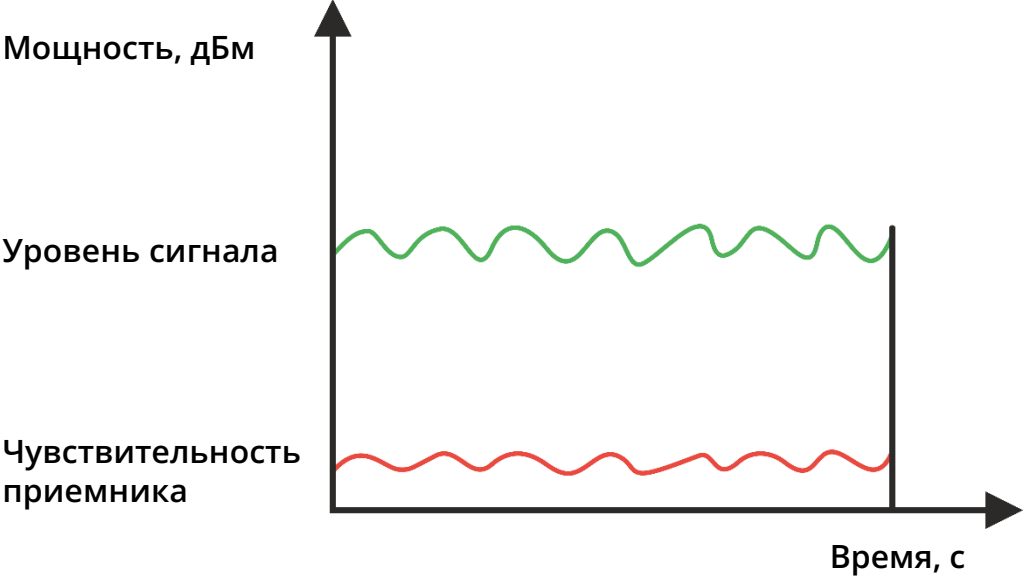
$$P_{\text{ПР}} = -95 \text{ дБм} + 0 \text{ дБ} - 10 \text{ дБи} = -105 \text{ дБм}$$

**Затухание сигнала**

$$L_{\text{ДОП}} = 30 \text{ дБм} - (-105 \text{ дБм}) = 135 \text{ дБ}$$



# Распространение сигнала





## Модель распространения сигнала в свободном пространстве

$$\frac{P_{np}}{P_{пер}} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 = \left( \frac{c}{4\pi r f} \right)^2$$

$$L(d) = -10 \lg G_t - 10 \lg G_r + 20 \lg f_{[МГц]} + 20 \lg d_{[км]} + 32,44$$

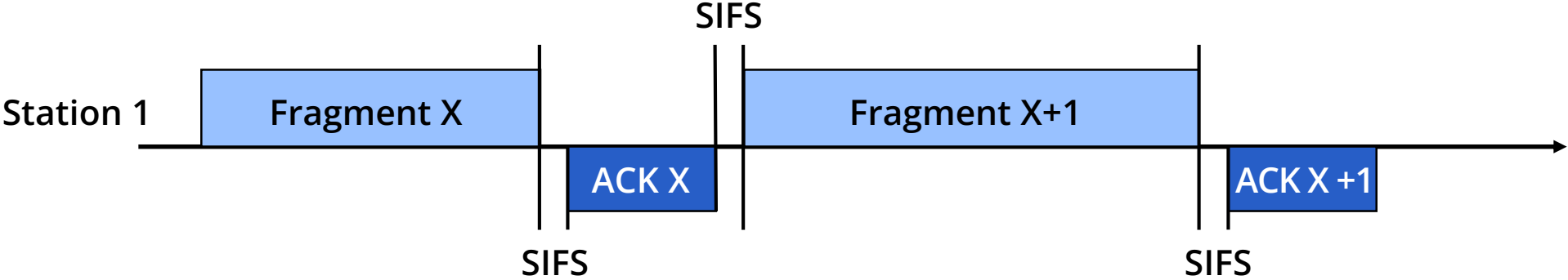
## Модель Окумуры-Хата

$$L = 69.55 + 26.16 \cdot \lg f - 13.82 \cdot \lg h_{BC} - \alpha(h_{MC}) + (44.9 - 6.55 \cdot \lg h_{BC}) \cdot \lg R$$

# Распространение сигнала



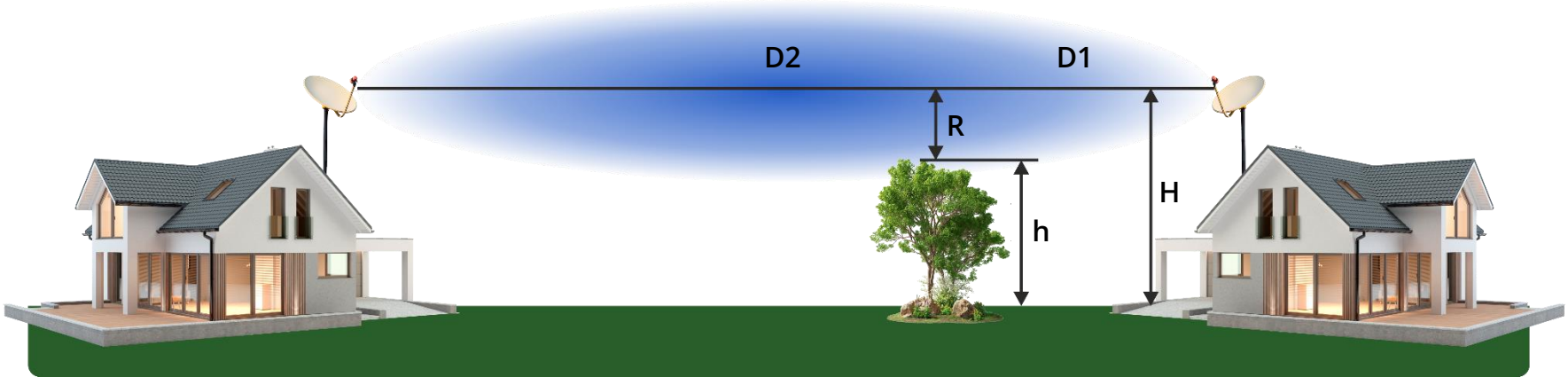
Timeout ACK



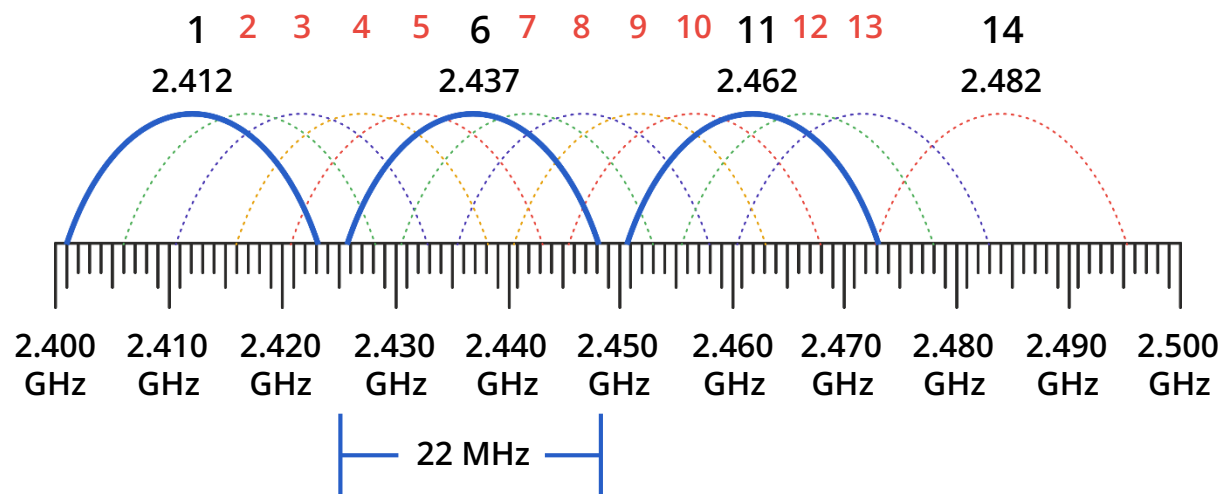
# Зона Френеля



$$R = \sqrt{\frac{D1 \cdot D2}{D1 + D2} \cdot \frac{300000000}{\text{Freq}}}$$

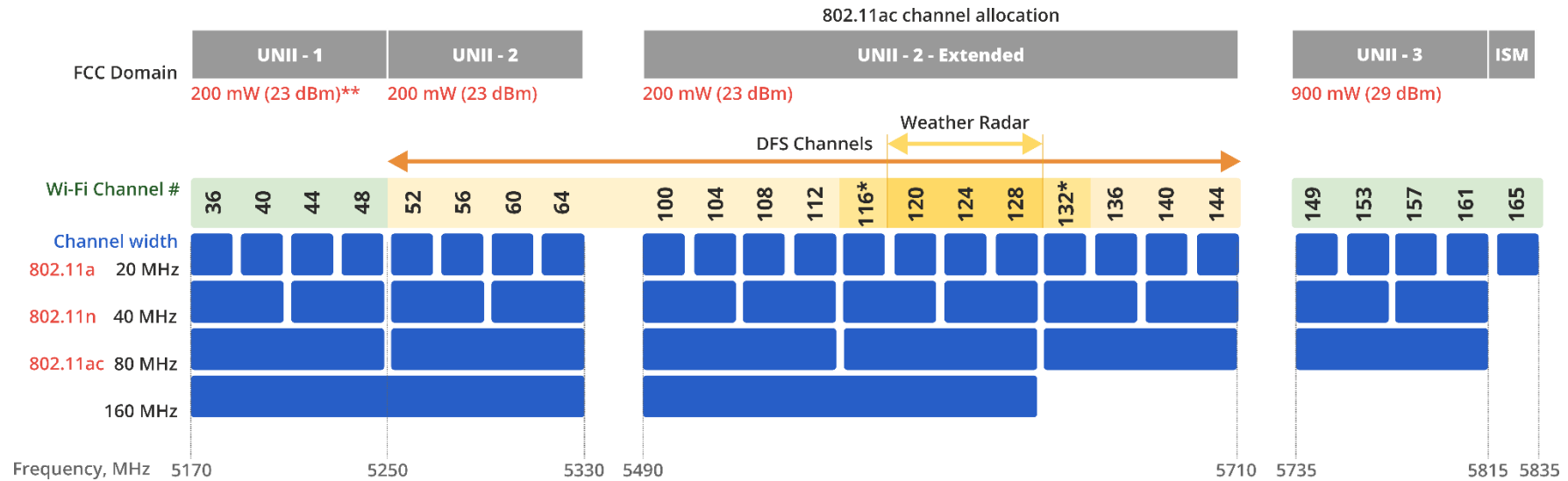


# Каналы и полосы



$$F = 2407 + 5 \cdot n, \text{ МГц}$$

# Каналы и полосы



$$F = 5000 + 5 \cdot n, \text{ МГц}$$

# Каналы и полосы



**Low Power Indoor**

Radio Band: 5dBm/MHz - Net EIRP 18dBm, 1.2 Gigahertz Proposed

Qty	Center Freq	5.925	5.955	5.975	5.995	6.015	6.035	6.055	6.075	6.095	6.115	6.135	6.155	6.175	6.195	6.215	6.235	6.255	6.275	6.295	6.315	6.335	6.355	6.375	6.395	6.415	6.435
59	20 MHz	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81	85	87	93		
12	40 MHz	3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91														
6	80 MHz	7	23	39	55	71	23																				
3	160 MHz	15	47	79																							

**Standard Power AP**

Radio Band: 36dBm with Automated Frequency Coordination (AFC)

Qty	Center Freq	5.925	5.955	5.975	5.995	6.015	6.035	6.055	6.075	6.095	6.115	6.135	6.155	6.175	6.195	6.215	6.235	6.255	6.275	6.295	6.315	6.335	6.355	6.375	6.395	6.415	6.435
59	20 MHz	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81	85	87	93		
12	40 MHz	3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91														
6	80 MHz	7	23	39	55	71	23																				
3	160 MHz	15	47	79																							

**Low Power Indoor**

Radio Band	Center Freq	6.425	6.435	6.455	6.475	6.495	6.515	6.535	6.555	6.575	6.595	6.615	6.635	6.655	6.675	6.695	6.715	6.735	6.755	6.775	6.795	6.815	6.835	6.855	6.875	6.895	6.915	6.935	6.955	6.975	6.995	7.015	7.035	7.055	7.075	7.095	7.115	
20 MHz		97	101	105	109	113	117	121	125	129	133	137	141	145	149	153	157	161	165	169	173	177	181	185	189	193	197	201	205	209	213	217	221	225	229	233		
40 MHz		99	107	115	123	131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	211	219	227																				
80 MHz		103	119	135	151	167	183	199	215																													
160 MHz		111	143	175	207																																	

**Standard Power AP**

Radio Band	Center Freq	6.425	6.435	6.455	6.475	6.495	6.515	6.535	6.555	6.575	6.595	6.615	6.635	6.655	6.675	6.695	6.715	6.735	6.755	6.775	6.795	6.815	6.835	6.855	6.875	6.895	6.915	6.935	6.955	6.975	6.995	7.015	7.035	7.055	7.075	7.095	7.115		
20 MHz							117	121	125	129	133	137	141	145	149	153	157	161	165	169	173	177	181																
40 MHz							123	131	139	147	155	163	171	179																									
80 MHz							135	151	167	183	199	215																											
160 MHz							143																																

$$F = 5950 + 5 \cdot n, \text{ МГц}$$





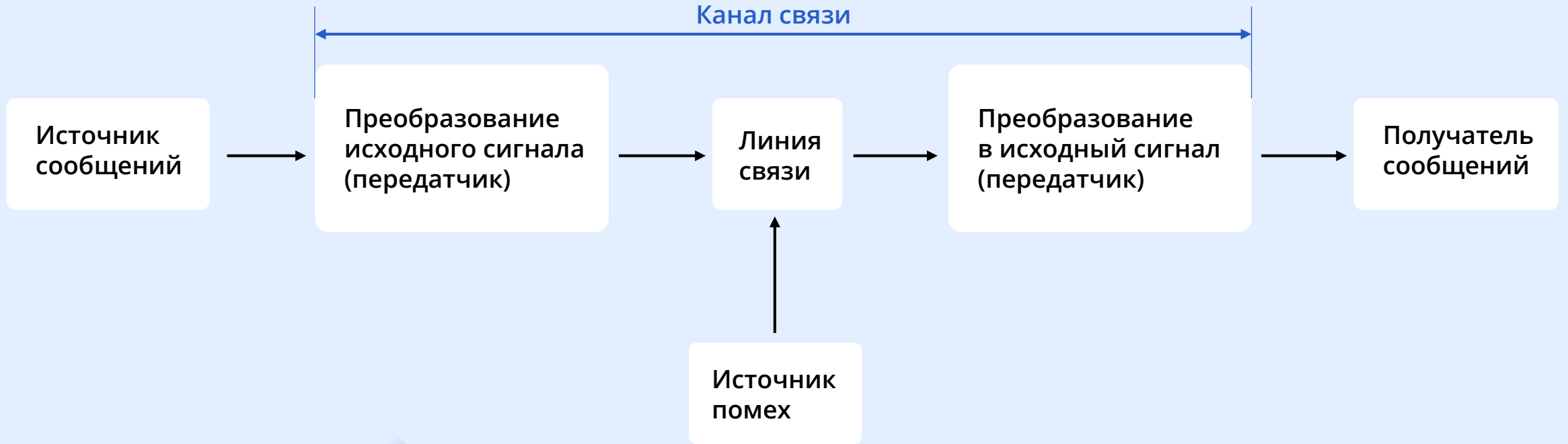
```
case NL80211_BAND_6GHZ:
    /* see 802.11ax D6.1 27.3.23.2 */
    if (chan == 2)
        return MHZ_TO_KHZ(5935);
    if (chan <= 233)
        return MHZ_TO_KHZ(5950 + chan * 5);
```

# Стандарты IEEE 802.11a/b/g/n/ac/ax/be



Year	Years	IEEE Name	WFA Name	# of MCS	Max Speed	SS	Frequencies	Max Channel BW	# Ch	Total Bandwidth
1997		802.11		2	2 Mb	1	2.4 GHz	22	3	80 MHz
1999	2	802.11a		12	54 Mb	1	5 GHz	20	9	180 MHz
1999	0	802.11b		4	11 Mb	1	2.4 GHz	22	3	80 MHz
2003	4	802.11g		12	54 Mb	1	2.4 GHz	20	3	80 MHz
2009	6	802.11n	Wi-Fi 4	77	600 Mb	4	2.4 GHz & 5 GHz	20 MHz / 40 MHz	27	560 MHz
2013	4	802.11ac	Wi-Fi 5	624	1.73 Gb	8	5 GHz & 5 GHz	20 MHz / 80 MHz	25	500 MHz
2019	6	802.11ax	Wi-Fi 6	1728	9.6 Gb	8	2.4 GHz, 5 GHz & 6 GHz	20 MHz / 160 MHz	28	580 MHz
2021	2	802.11ax	Wi-Fi 6E	1728	9.6 Gb	8	2.4 GHz, 5 GHz & 6 GHz	20 MHz / 160 MHz	87	1780 MHz
2023	2	802.11be	Wi-Fi 7	4032	49 Gb	16	2.4 GHz, 5 GHz & 6 GHz	20 MHz / 320 MHz	87	1840 MHz

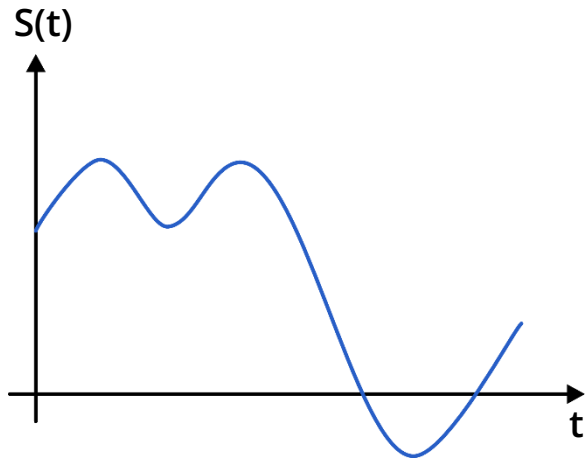
# Теория сигналов



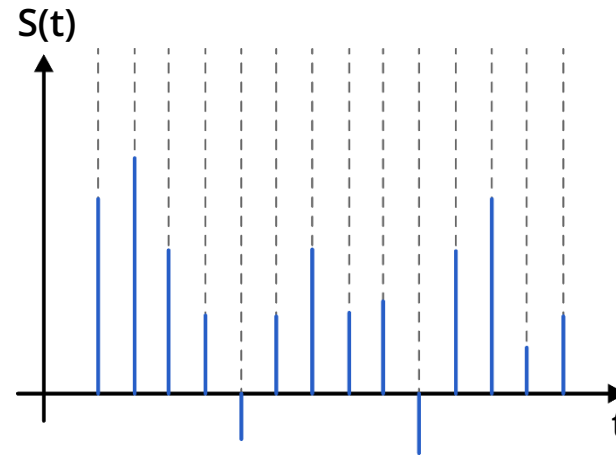
# Теория сигналов



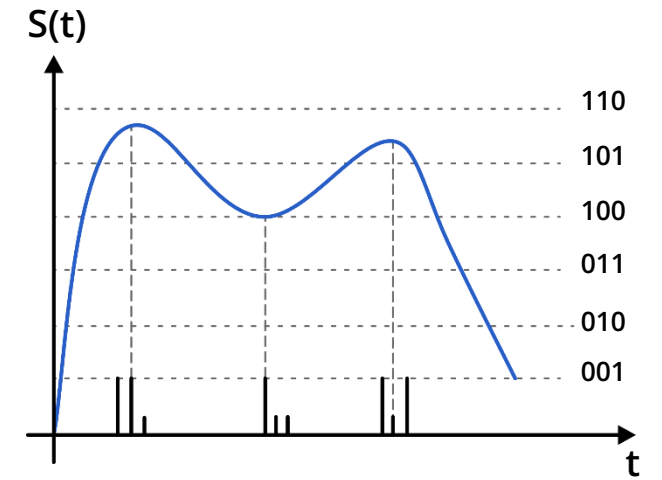
## Непрерывный (аналоговый)



## Дискретный



## Цифровой





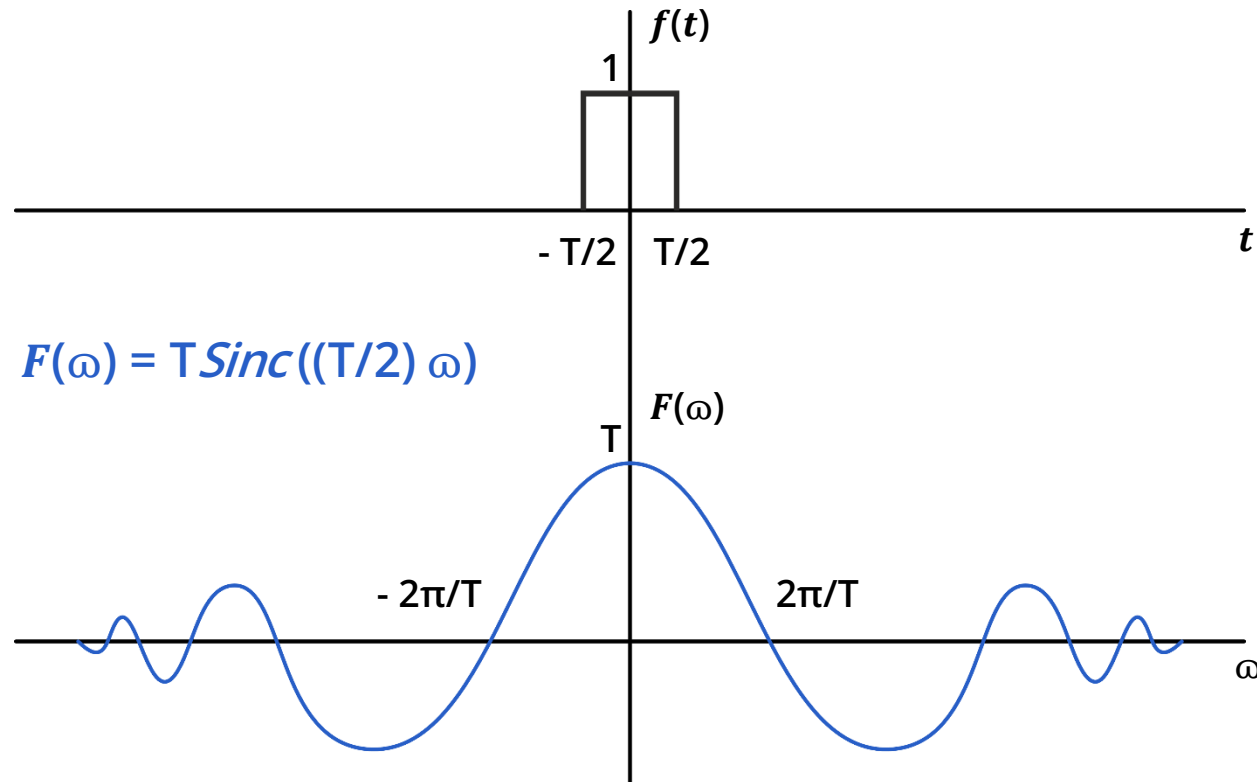
## Прямое преобразование Фурье

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt$$

## Обратное преобразование Фурье

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \cdot e^{+i2\pi ft} dt$$

# Теория сигналов





## Дискретное преобразование Фурье

Фурье-преобразование дискретной функции одной переменной  $f(x), x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ , задаётся равенством

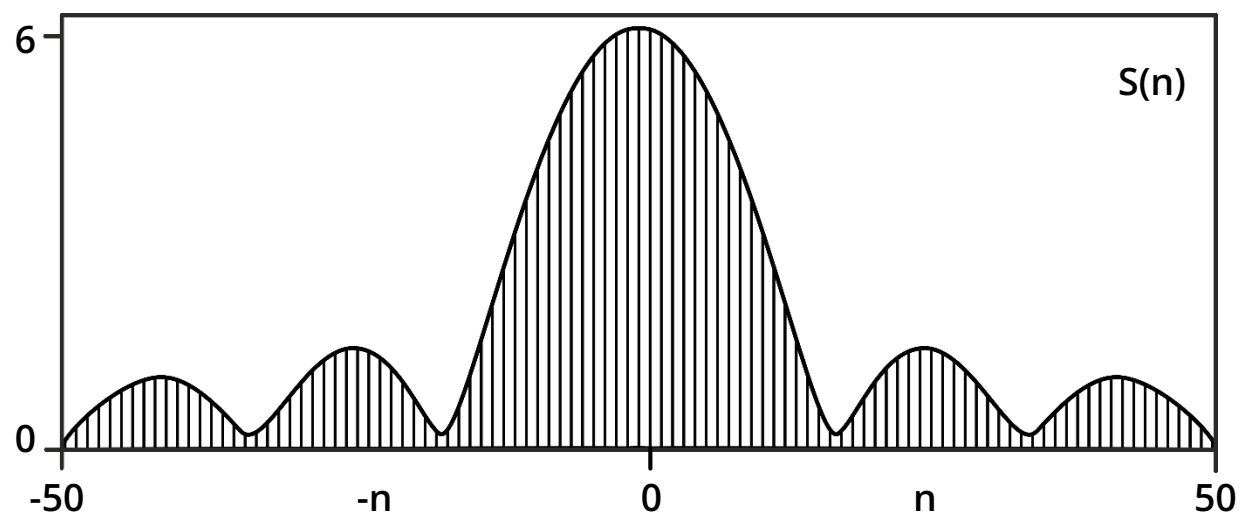
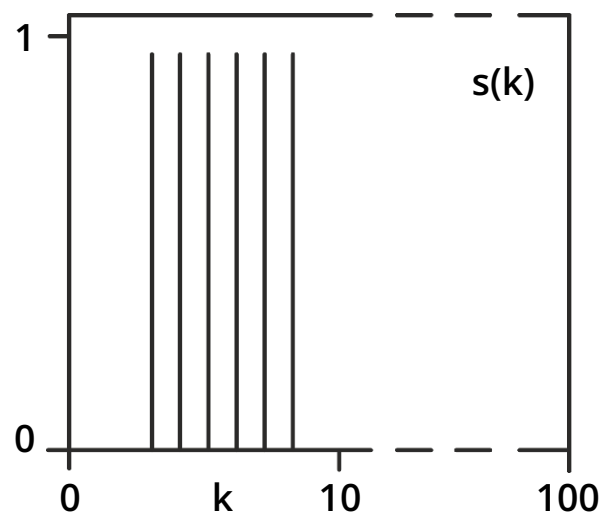
$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi ux / M}, \quad u = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

Обратное преобразование

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) e^{i2\pi ux / M}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, M-1$$







# Теория сигналов



## Теорема Котельникова

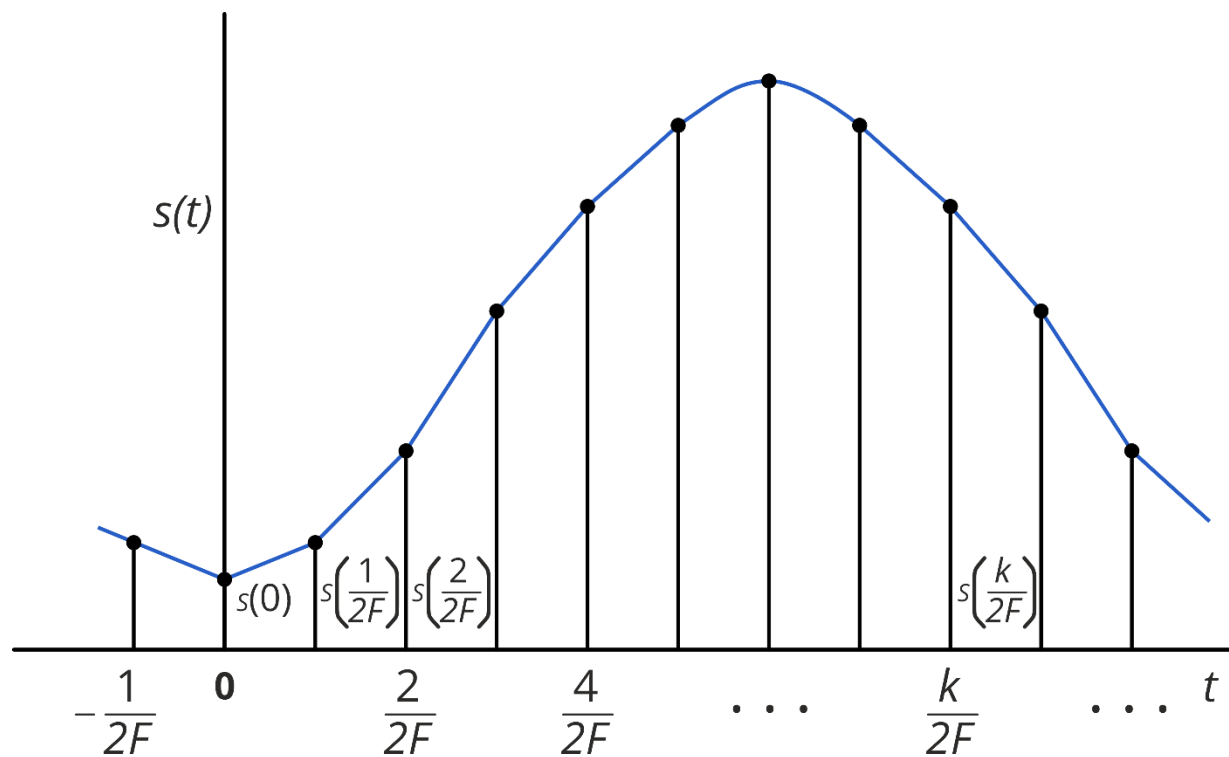
Непрерывный сигнал  $S(t)$  с ограниченным спектром можно точно восстановить по его отсчетам  $s(k\Delta t)$ , взятым через интервалы

$\Delta t = 1/2F$ , где  $F$  - верхняя частота спектра сигнала

Теорема Котельникова может быть представлена рядом:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F(t - k\Delta t)}{2\pi F(t - k\Delta t)}$$





# Модуляция и кодирование



## Модуляция

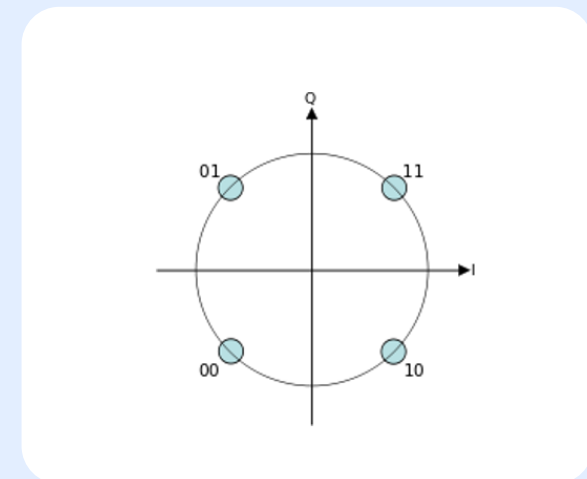
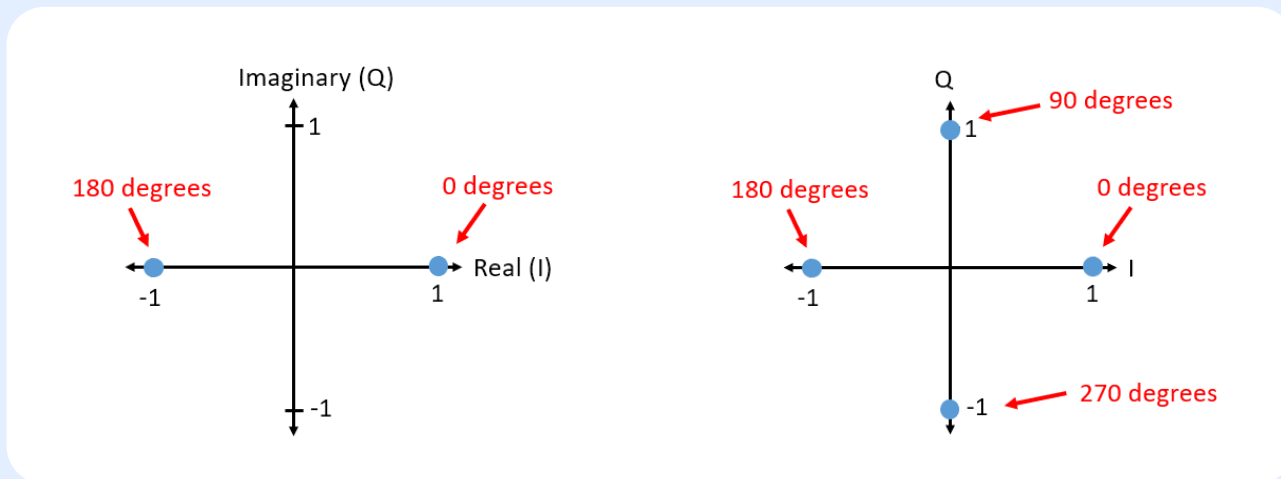
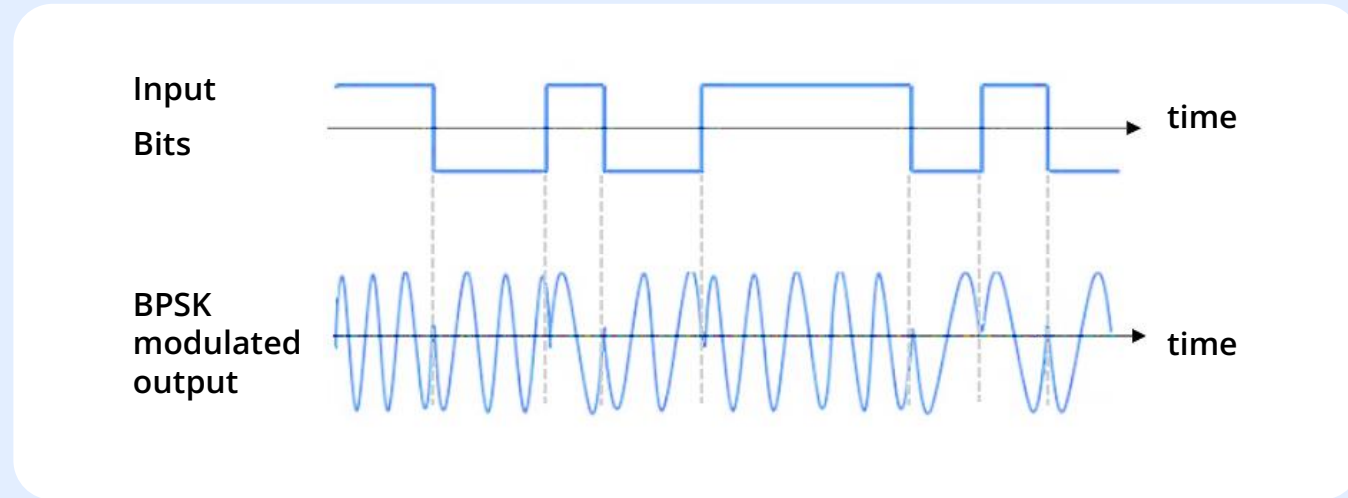
- Амплитудная
- Частотная
- Фазовая

$$s(t) = a(t) \cos[\omega(t)t + \varphi(t)].$$

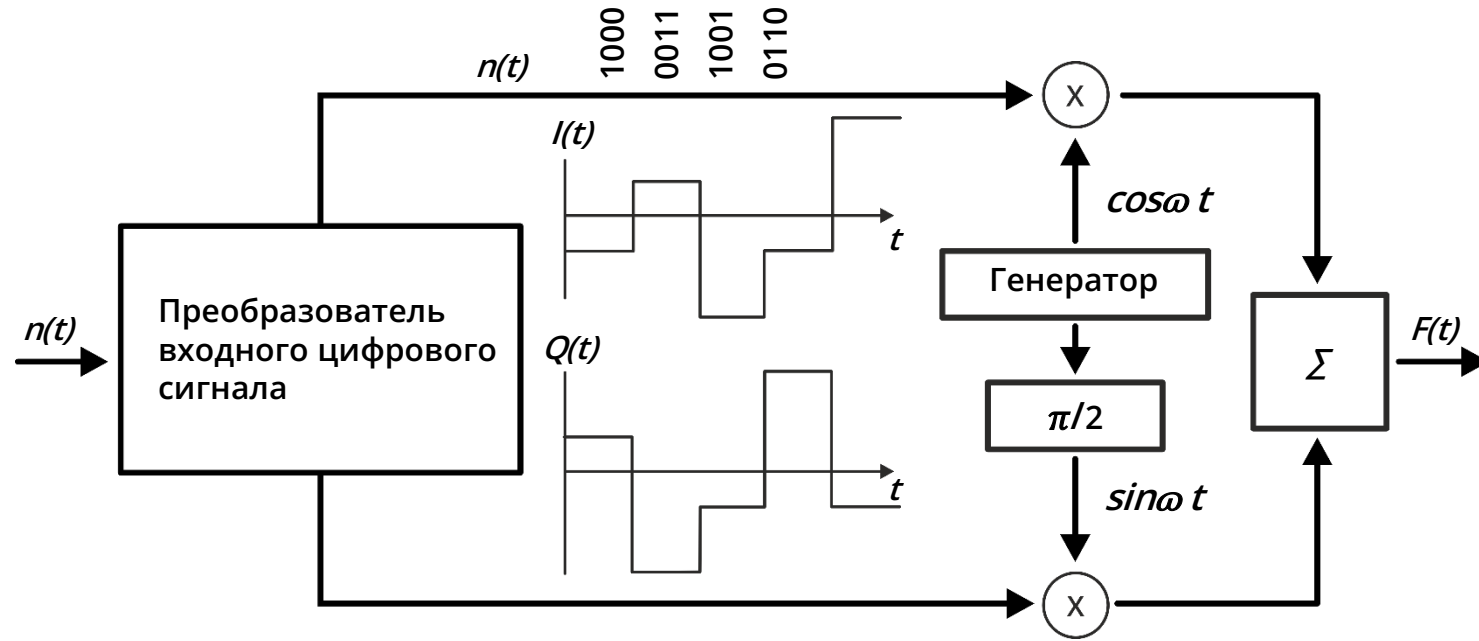
## Манипуляция

- BPSK
- DBPSK
- QPSK
- DQPSK
- QAM

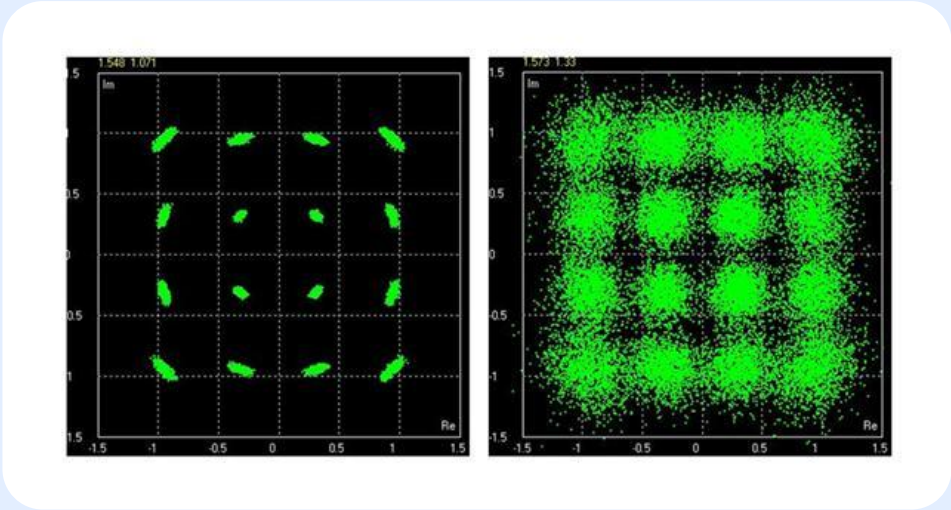
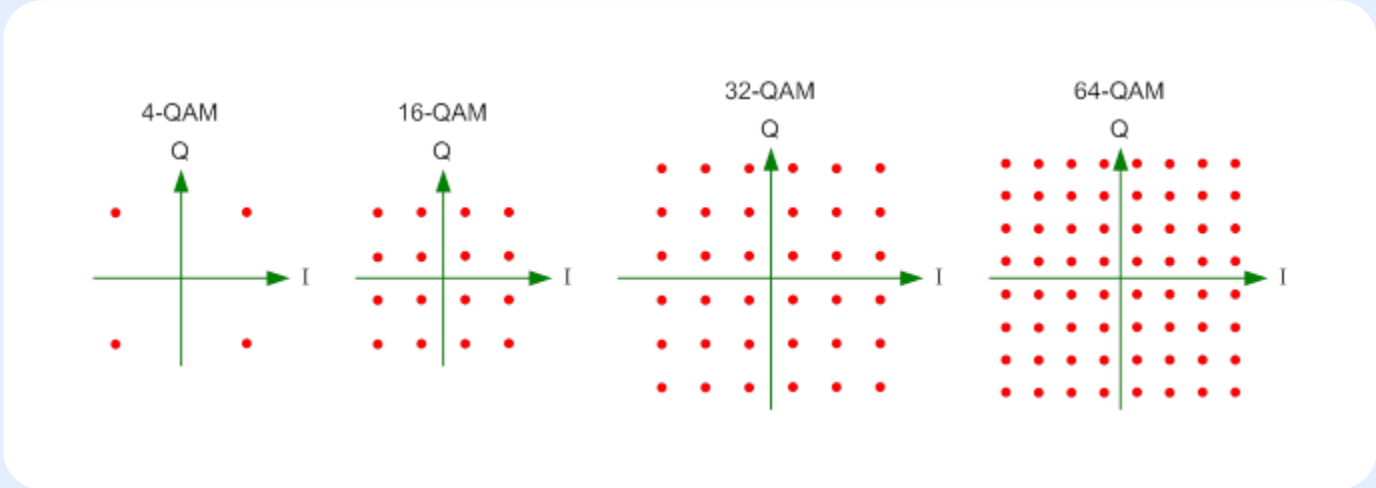
# Модуляция и кодирование



# Модуляция и кодирование

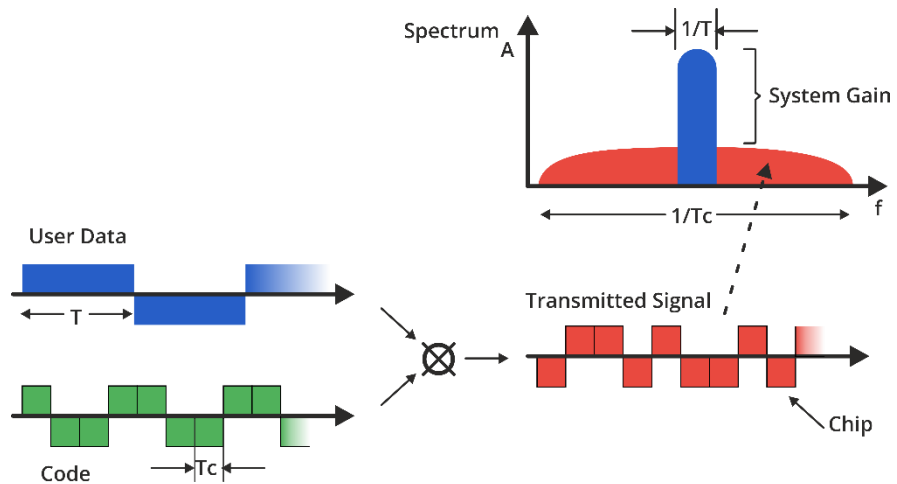


# Модуляция и кодирование





## DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)



## CCK (Complementary Code Keying)

$$C = \left\{ e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4)}, \right. \\ \left. -e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)}, e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)}, -e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}, e^{j(\varphi_1)} \right\}$$

# Что появилось раньше – А или В?



802.11b – год появления?

802.11a – год появления?

# Что появилось раньше – А или В?



802.11b – 1999 год

802.11a – 1999,  
выход продуктов в 2001 году

# Канальная скорость – как посчитать?

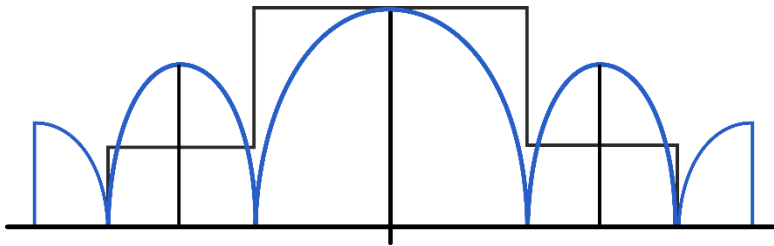


Формулы... Много формул

# 802.11b. DSSS

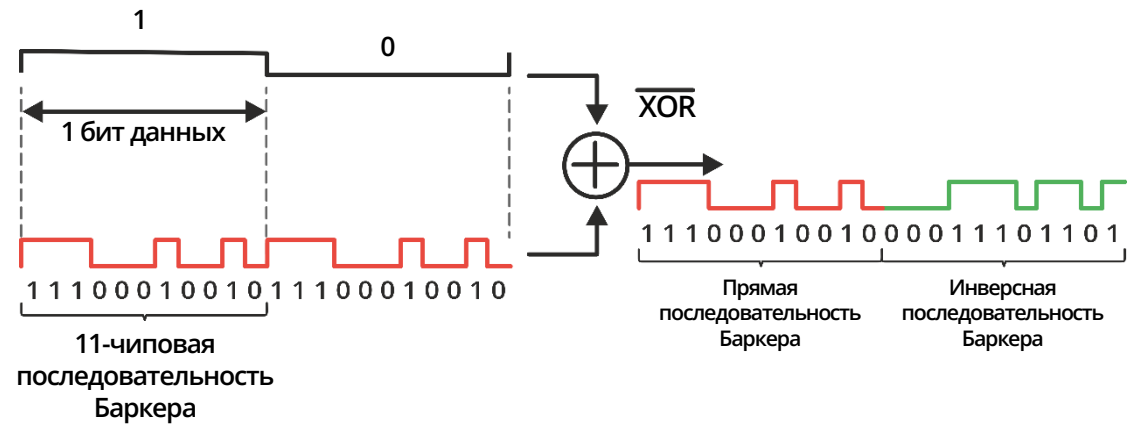


Полоса пропускания 22 МГц



Код Баркера: 10110111000

$$data \oplus 10110111000 = \text{coded data (chips)}$$



# 802.11b. DSSS



В DSSS приходится 11 чипов на символ.  
Чиповая скорость равна 11 MHz (11 Мчип/с).  
Длительность 1 чипа равна:

$$T = \frac{1}{11} \text{ мкс}$$

Длительность 11 чипов равна 1 мкс.  
В BPSK 1 символ несет 1 бит информации.  
Тогда канальная скорость равна:

$$Rate_{BPSK} = \frac{1 \text{ бит}}{1 \text{ мкс}} = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{бит}}{\text{с}} = 1 \text{ Мбит / с}$$

$$Rate_{QPSK} = \frac{2 \text{ бит}}{1 \text{ мкс}} = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{бит}}{\text{с}} = 2 \text{ Мбит / с}$$

# 802.11b. ССК



В ССК приходится 8 чипов на символ.  
Чиповая скорость равна 11 MHz (11 Мчип/с).  
Длительность 1 чипа равна:

$$T = \frac{1}{11} \text{ мкс}$$

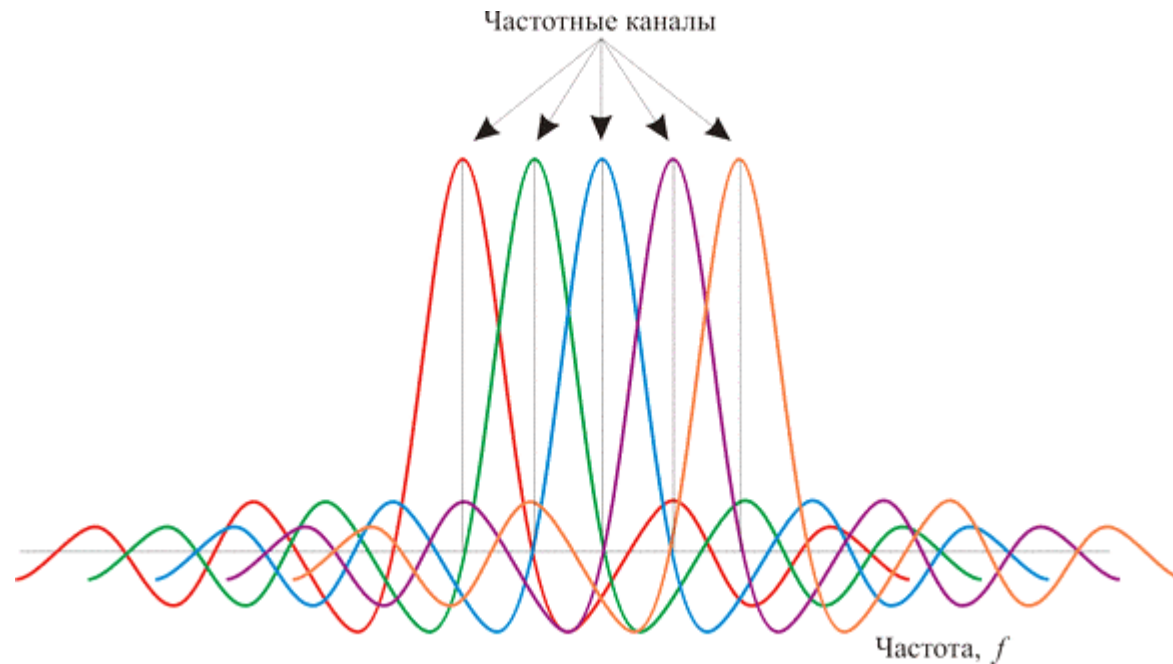
Длительность 8 чипов равна 8/11 мкс.  
В BPSK 1 символ несет 4 бит информации.  
Тогда канальная скорость равна:

$$Rate_{BPSK} = \frac{4 \text{ бит}}{\frac{8}{11} \text{ мкс}} = 5.5 \text{ Мбит / с}$$

$$Rate_{QPSK} = \frac{8 \text{ бит}}{\frac{8}{11} \text{ мкс}} = 11 \text{ Мбит / с}$$

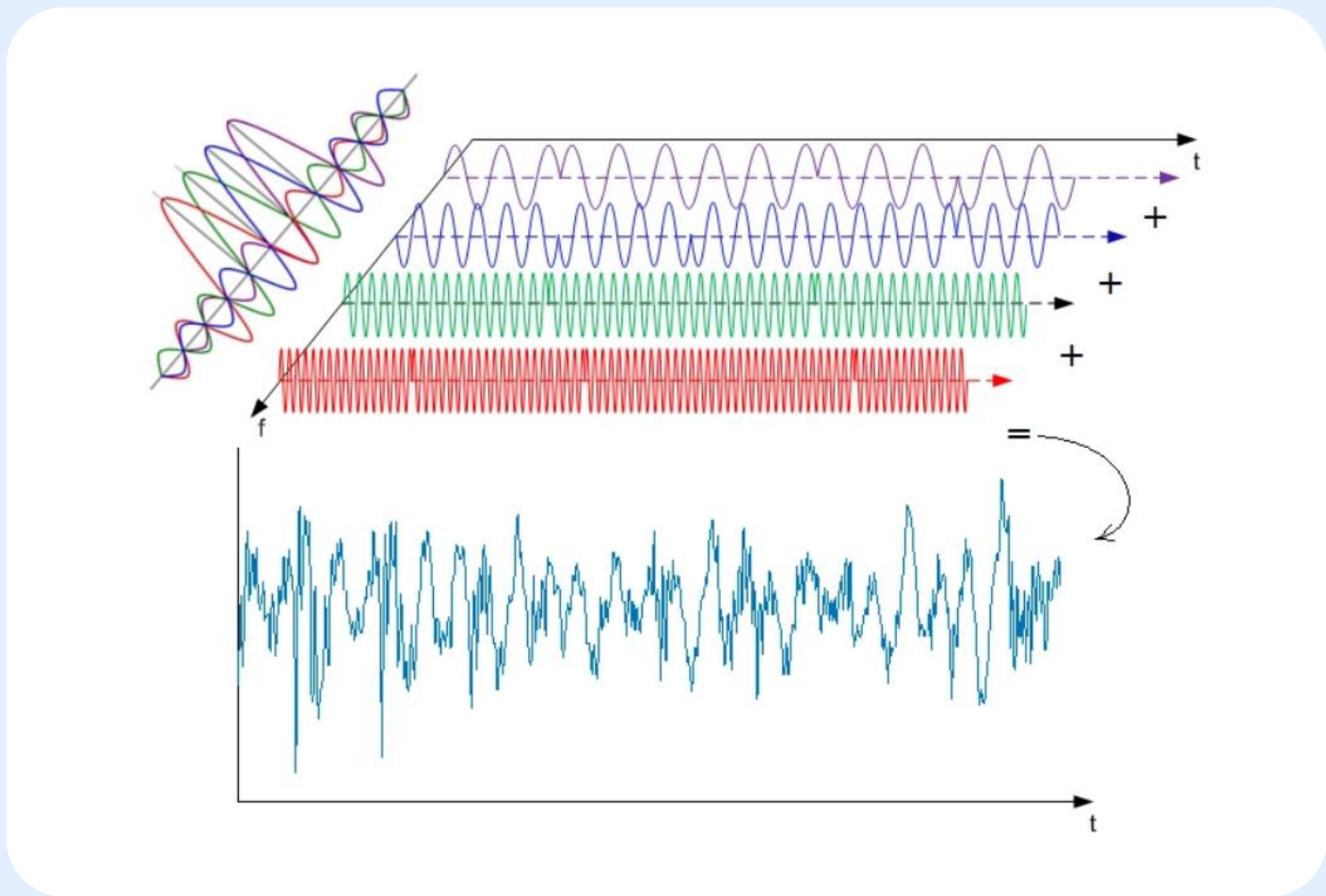
# Модуляция и кодирование

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)





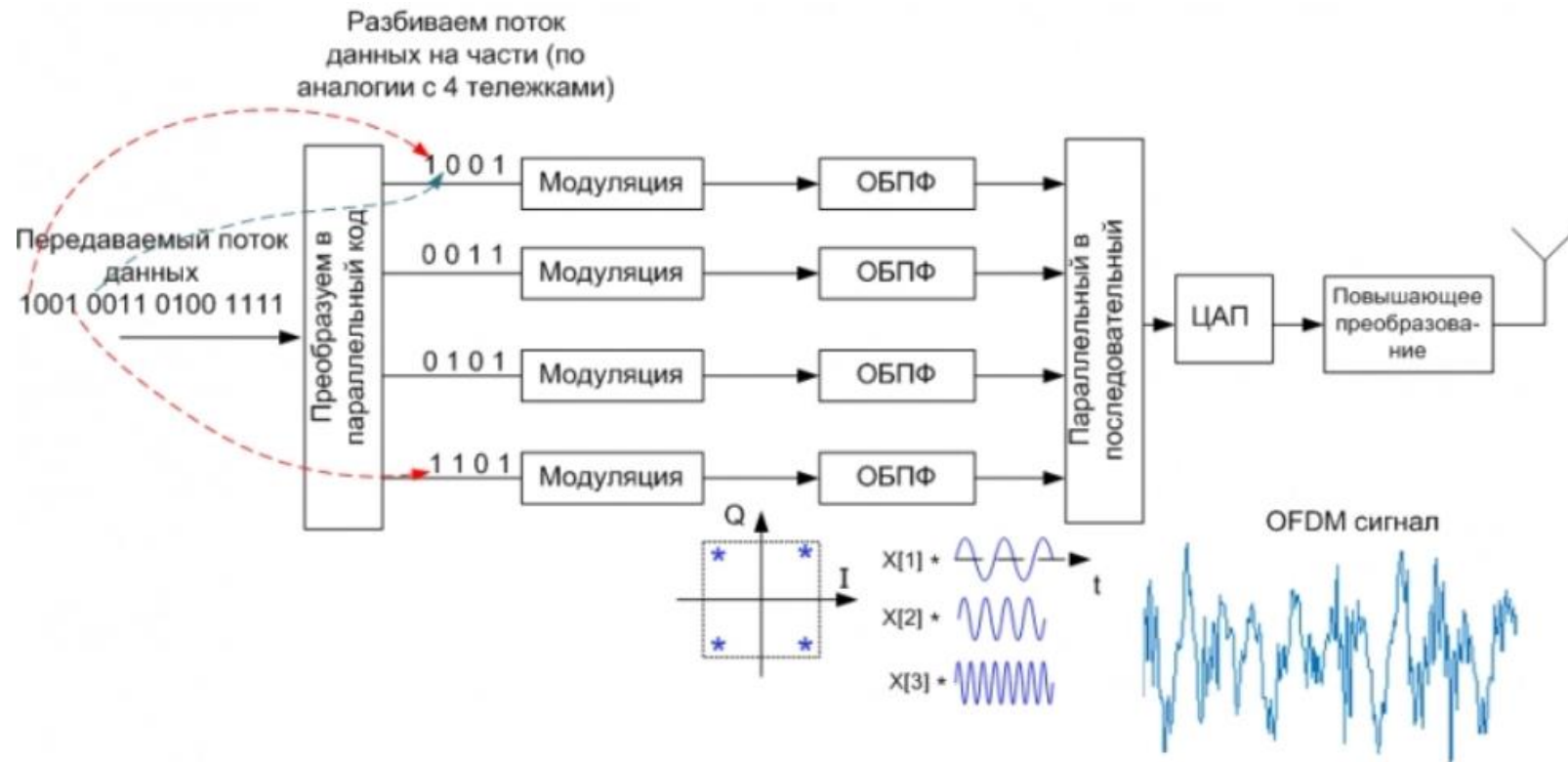
# Модуляция и кодирование



# Модуляция и кодирование



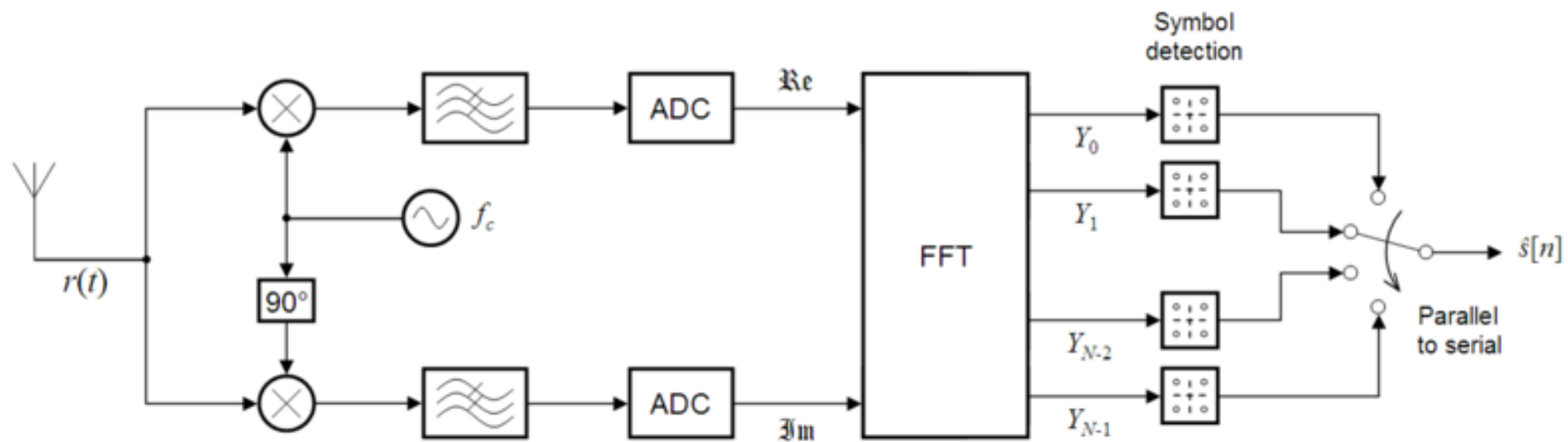
## OFDM



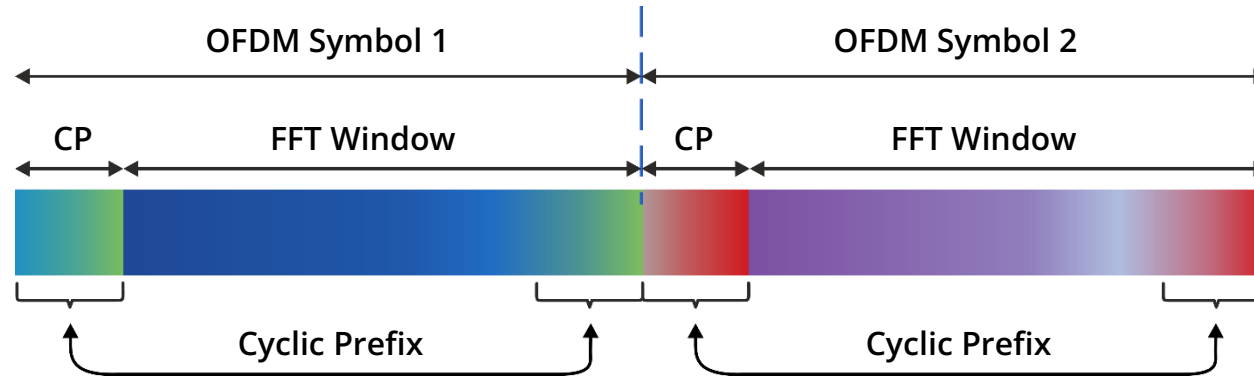
# Модуляция и кодирование



## OFDM



# 802.11a. OFDM



Полоса канала 20 МГц.

В 20 МГц всего 52 поднесущих: 48 для данных и 4 для пилот-сигналов.

Ширина одной поднесущей (64 поднесущие - из Фурье):

$$f = \frac{20 \text{ MHz}}{64 \text{ поднесущих}} = 312.5 \text{ кГц}$$

Длительность OFDM символа равна 4 мкс.  
Длительность GI (CP) равна 0.8 мкс.

Тогда канальная скорость равна:

$$Rate_{BPSK \ R=1/2} = 312.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{4-0.8}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 48 = 6 \text{ Мбит / с}$$

$$Rate_{QAM \ 64 \ R=3/4} = 312.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{4-0.8}{4} \cdot \frac{3}{4} \cdot 6 \cdot 48 = 54 \text{ Мбит / с}$$

# Параметры модуляционных схем (MCS)



Параметр	Значение
MCS	Модуляция и ее кодовая схема
VHT MCS	MCS с очень высокой пропускной способностью
MCS Index	Индекс модуляции
NSS	Число пространственных потоков
R	Канальная скорость
NBPSC	Количество закодированных битов на поднесущую
NBPSCS(iSS)	Количество закодированных битов на поднесущую для каждого потока stream, $iSS = 1, \dots, NSS$
NSD	Количество поднесущих с данными
NSP	Количество поднесущих с пилот-сигналом
NCBPS	Количество закодированных битов на OFDM символ
NDBPS	Количество битов данных на OFDM символ
NES	Количество двоичных сверточных кодеров
GI	Защитный интервал
Data rate	Канальная скорость



# Канальная скорость 802.11n, 40 МГц, NSS=4



MCS Index	Modulation	R	NBPSCS (iSS)	NSD	NSP	NCBPS	NDBPS	NES	Data rate (Mb/s)	
									800 ns GI	400 ns GI
24	BPSK	1/2	1	108	6	432	216	1	54.0	60.0
25	QPSK	1/2	2	108	6	864	432	1	108.0	120.0
26	QPSK	3/4	2	108	6	864	648	1	162.0	180.0
27	16-QAM	1/2	4	108	6	1728	864	1	216.0	240.0
28	16-QAM	3/4	4	108	6	1728	1296	2	324.0	360.0
29	64-QAM	2/3	6	108	6	2592	1728	2	432.0	480.0
30	64-QAM	3/4	6	108	6	2592	1944	2	486.0	540.0
31	64-QAM	5/6	6	108	6	2592	2160	2	540.0	600.0

# Канальная скорость 802.11ac, 80 МГц, NSS=4



MPE-MCS Index	Modulation	R	NBPSCS	NSD	NSP	NCBPS	NDBPS	NES	Data rate (Mb/s)	
									800 ns GI	400 ns GI
0	BPSK	1/2	1	234	8	936	468	1	117.0	130.0
1	QPSK	1/2	2	234	8	1872	936	1	234.0	260.0
2	QPSK	3/4	2	234	8	1872	1404	1	351.0	390.0
3	16-QAM	1/2	4	234	8	3744	1872	1	468.0	520.0
4	16-QAM	3/4	4	234	8	3744	2808	2	702.0	780.0
5	64-QAM	2/3	6	234	8	5616	3744	2	936.0	1040.0
6	64-QAM	3/4	6	234	8	5616	4212	3	1053.0	1170.0
7	64-QAM	5/6	6	234	8	5616	4680	2	1170.0	1300.0
8	256-QAM	3/4	8	234	8	7488	5616	3	1404.0	1560.0
9	256-QAM	5/6	8	234	8	7488	6240	3	1560.0	1733.3



Полоса канала 20 МГц  
MCS5 (QAM64 R=2/3)

$$QAM\ 64 \rightarrow 64 = 2^6 \rightarrow 6\ \text{бит}$$

20 МГц  $\rightarrow$  52 поднесущих для данных

$$6 \times 52 = 312 \frac{\text{бит}}{\text{символ}}$$

$$312 \times \frac{2}{3} = 208 \frac{\text{закодированных бит}}{\text{символ}}$$





LGI = Long GI  
SGI = Short GI

	GI	OFDM символ
LGI	0.8 мкс	3.2 мкс
SGI	0.4	3.2 мкс

$LGI = 4 \text{ мкс}$   
 $SGI = 3.6 \text{ мкс}$

$$\frac{SGI}{LGI} = \frac{3.6}{4} = 90\%$$

Канальная скорость SGI выше на 10%

$$Rate_{QAM\ 64\ R=2/3\ LGI} = \frac{208}{4} = 52 \text{ Мбит/с}$$

$$Rate_{QAM\ 64\ R=2/3\ SGI} = \frac{208}{4} \cdot \frac{1}{0.9} = 57.8 \text{ Мбит/с}$$





Полоса канала 40 МГц  
MCS5 (QAM64 R=2/3)

40 МГц → 108 поднесущих для данных

$$6 \times 108 = 648 \frac{\text{бит}}{\text{символ}}$$

$$648 \times \frac{2}{3} = 432 \frac{\text{закодированных бит}}{\text{символ}}$$

$$Rate_{QAM\ 64\ R=2/3\ LGI} = \frac{432}{4} = 108 \text{ Мбит / с}$$

# 802.11ac. VHT NSS MCS



Полоса канала 80 МГц  
MCS5 (QAM64 R=2/3)

*80 МГц → 234 поднесущих для данных*

$$6 \times 234 = 1404 \frac{\text{бит}}{\text{символ}}$$

$$1404 \times \frac{2}{3} = 936 \frac{\text{закодированных бит}}{\text{символ}}$$

$$Rate_{QAM\ 64\ R=2/3\ LGI} = \frac{936}{4} = 234 \text{ Мбит / с}$$

# 802.11ax. HE NSS MCS



Полоса канала 160 МГц  
MCS5 (QAM64 R=2/3)

160 МГц → 468 поднесущих для данных

$$6 \times 468 = 2808 \frac{\text{бит}}{\text{символ}}$$

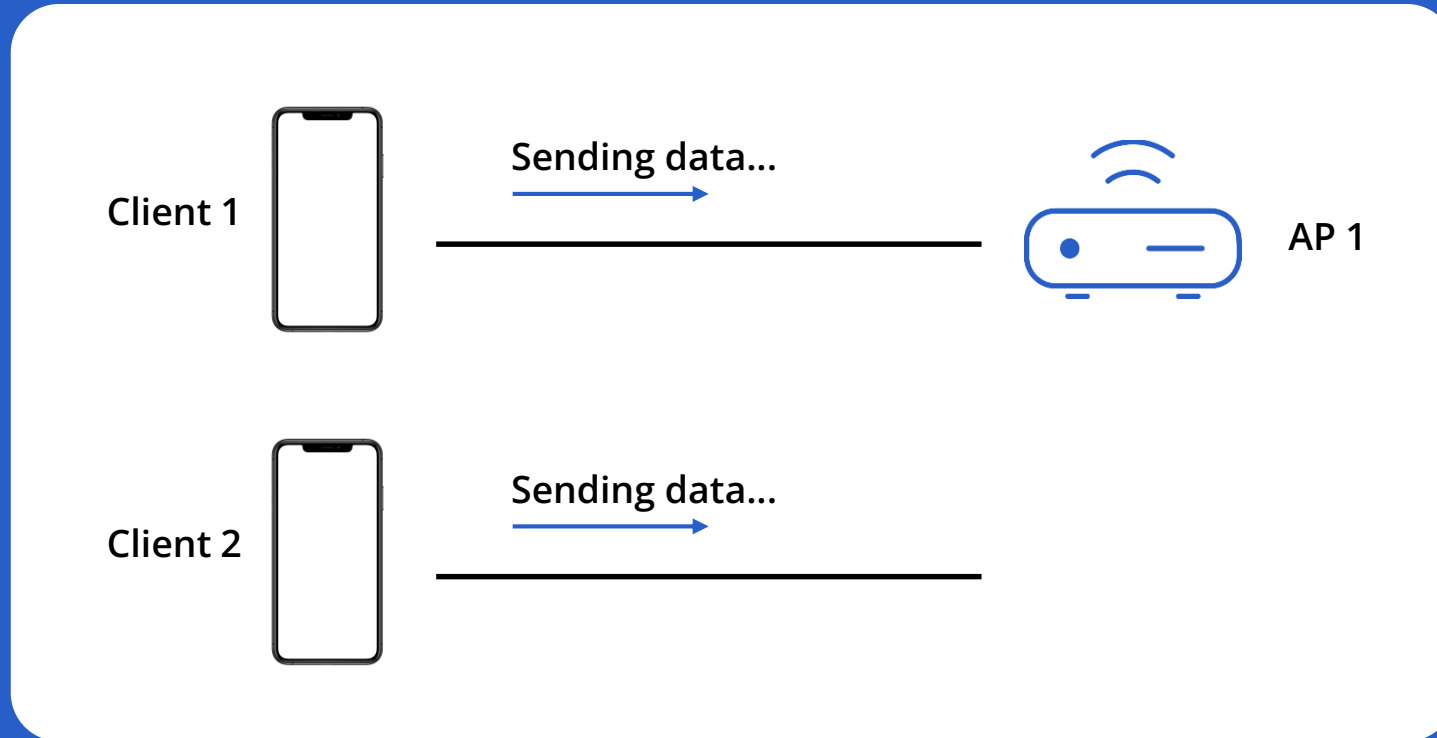
$$2808 \times \frac{2}{3} = 1872 \frac{\text{закодированных бит}}{\text{символ}}$$

$$Rate_{QAM\ 64\ R=2/3\ LGI} = \frac{1872}{4} = 468 \text{ Мбит / с}$$

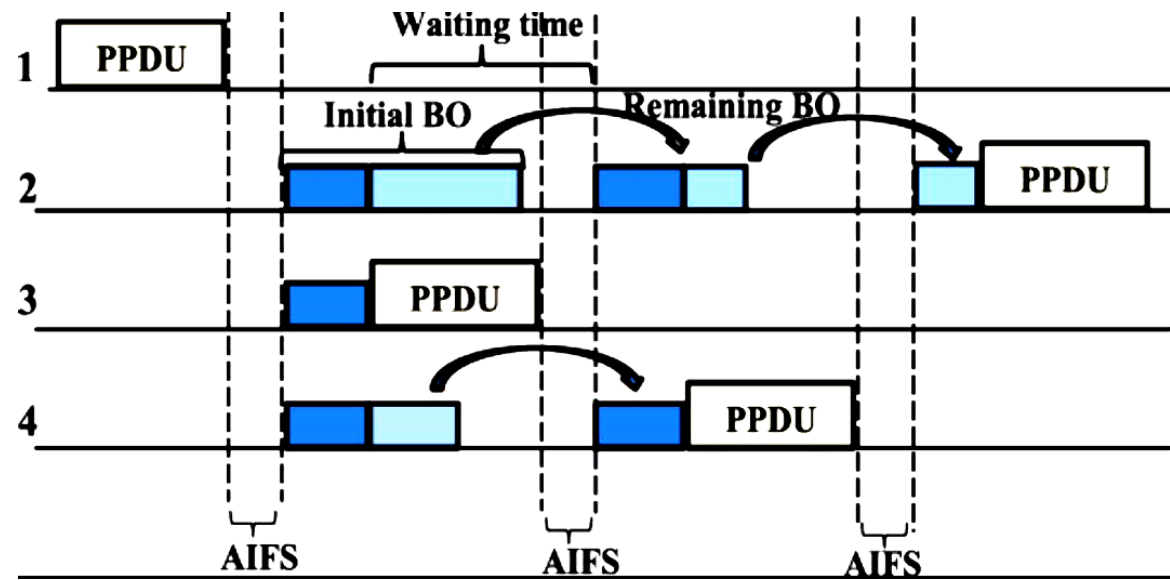
Все расчеты сделаны  
для одной антенны



# Как работает Wi-Fi?



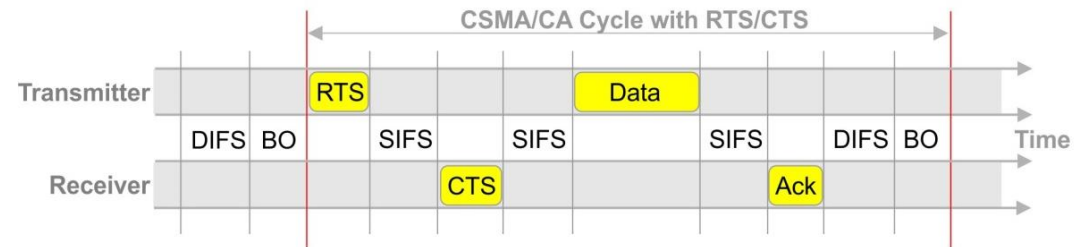
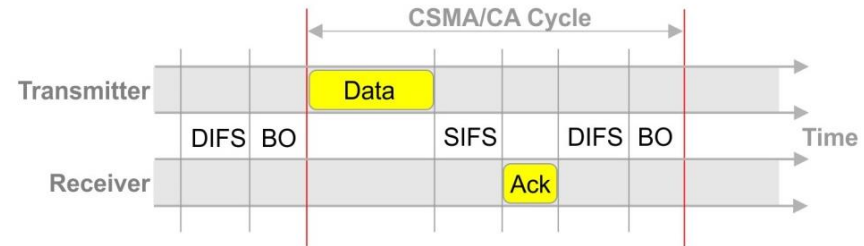
# Как работает Wi-Fi?



# Как работает Wi-Fi?



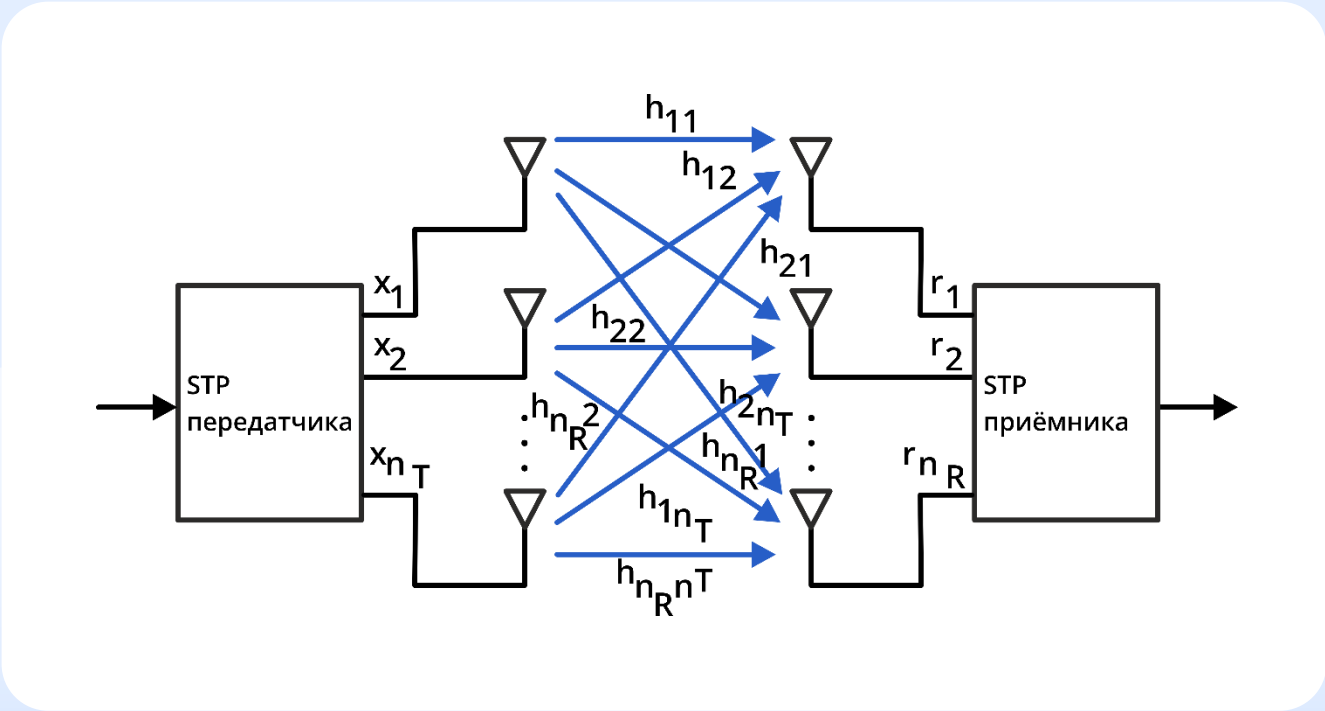
## CSMA/CA and RTS/CTS



DIFS = Distributed Inter-Frame Space  
SIFS = Short Inter-Frame Space  
BO = Back-Off time

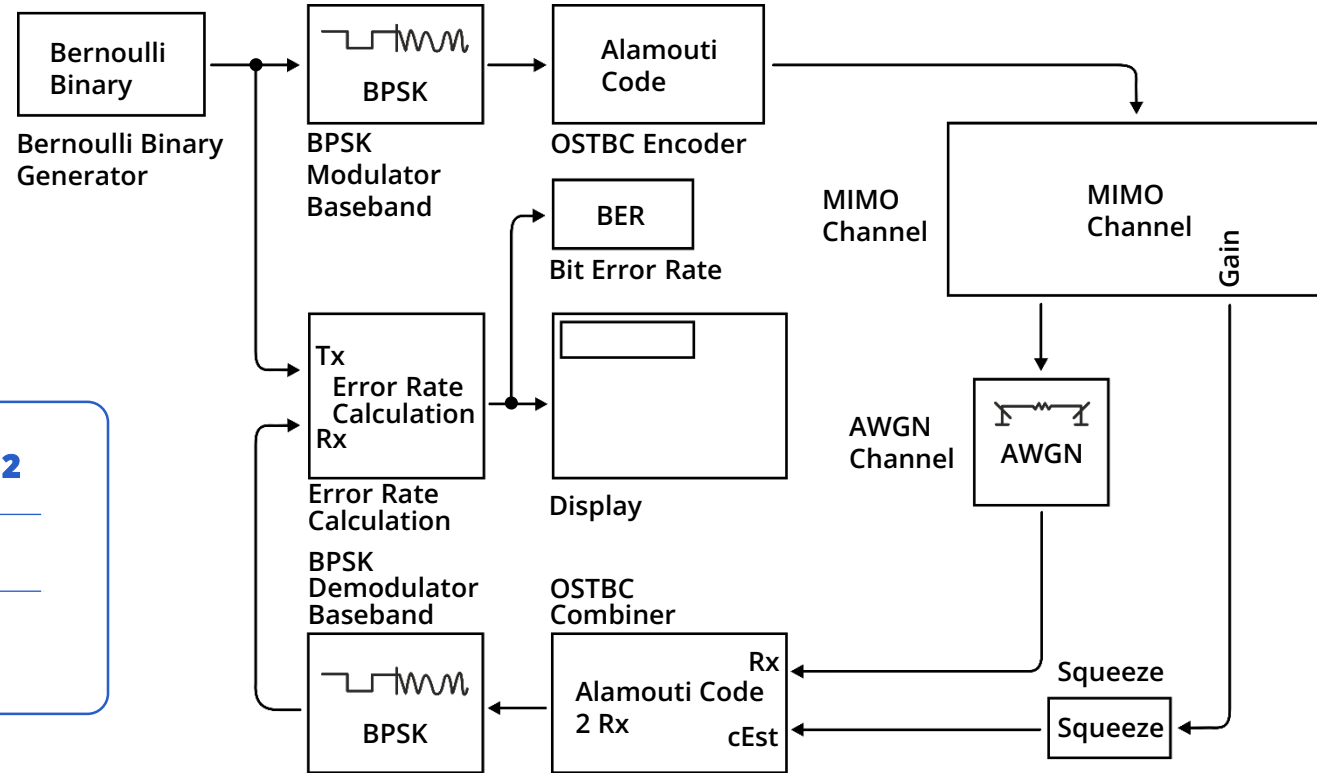
RTS = Request to Send  
CTS = Clear to Send  
Ack = Acknowledgement

# MIMO





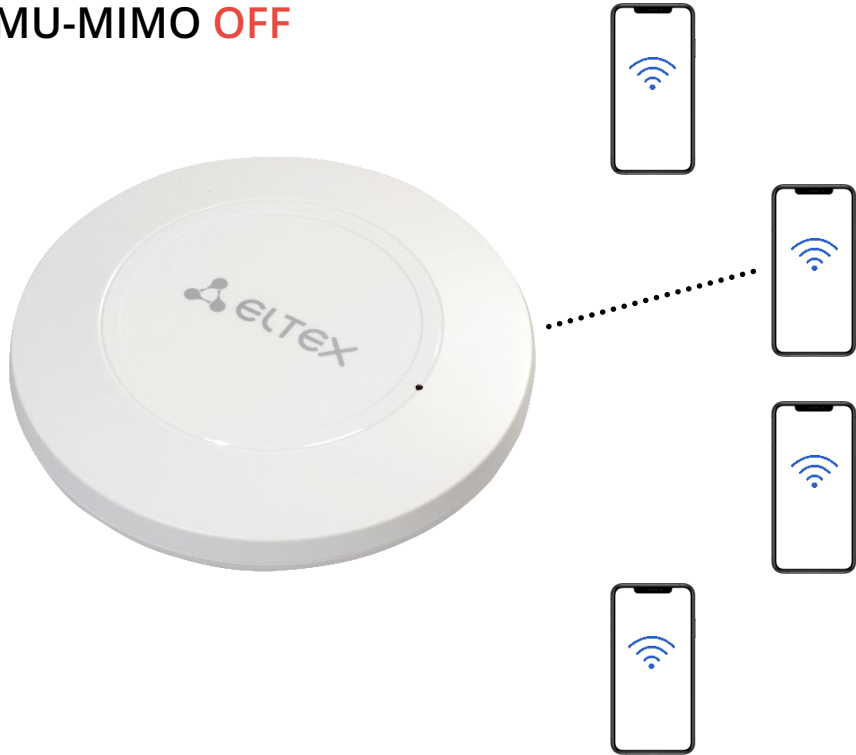
	Антенна 1	Антенна 2
$T$	$S_1$	$S_2$
$t + T$	$\overline{S_2}$	$-\overline{S_1}$



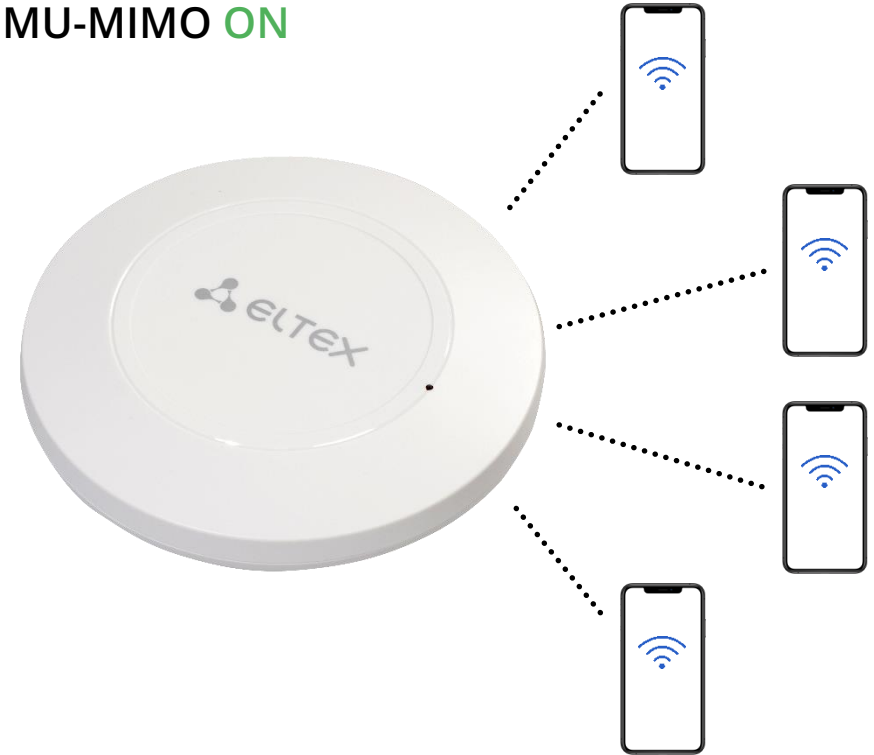
# MIMO



MU-MIMO OFF



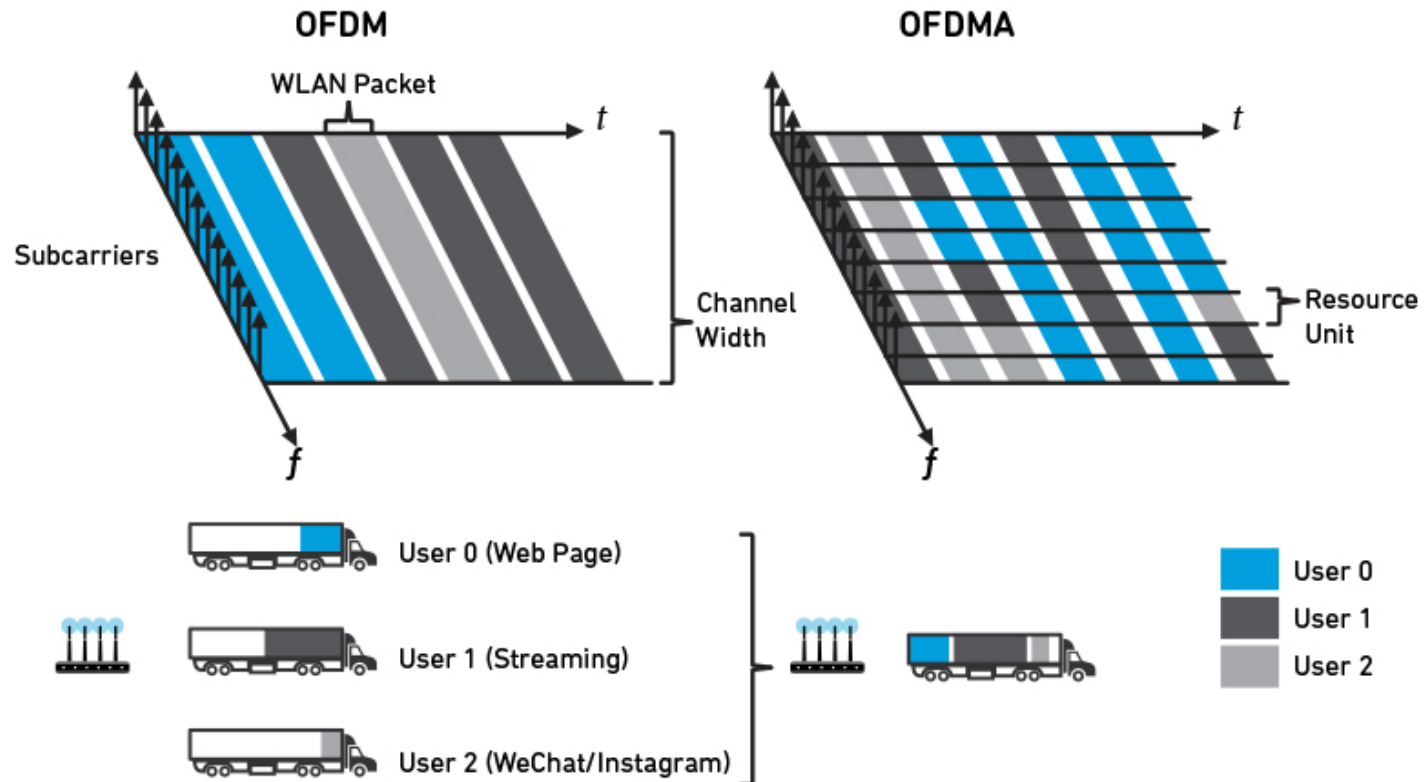
MU-MIMO ON



# OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)



Множественный доступ с ортогональным частотным разделением

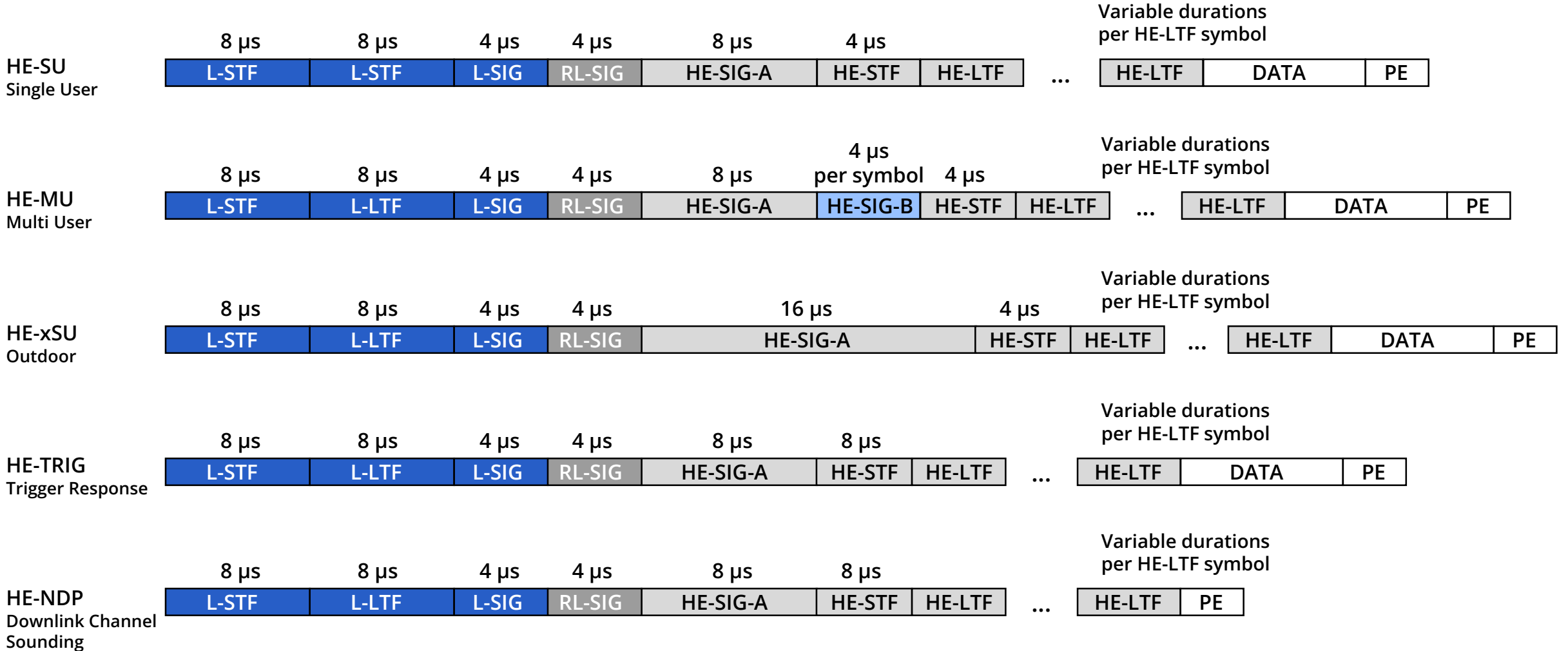


# OFDMA

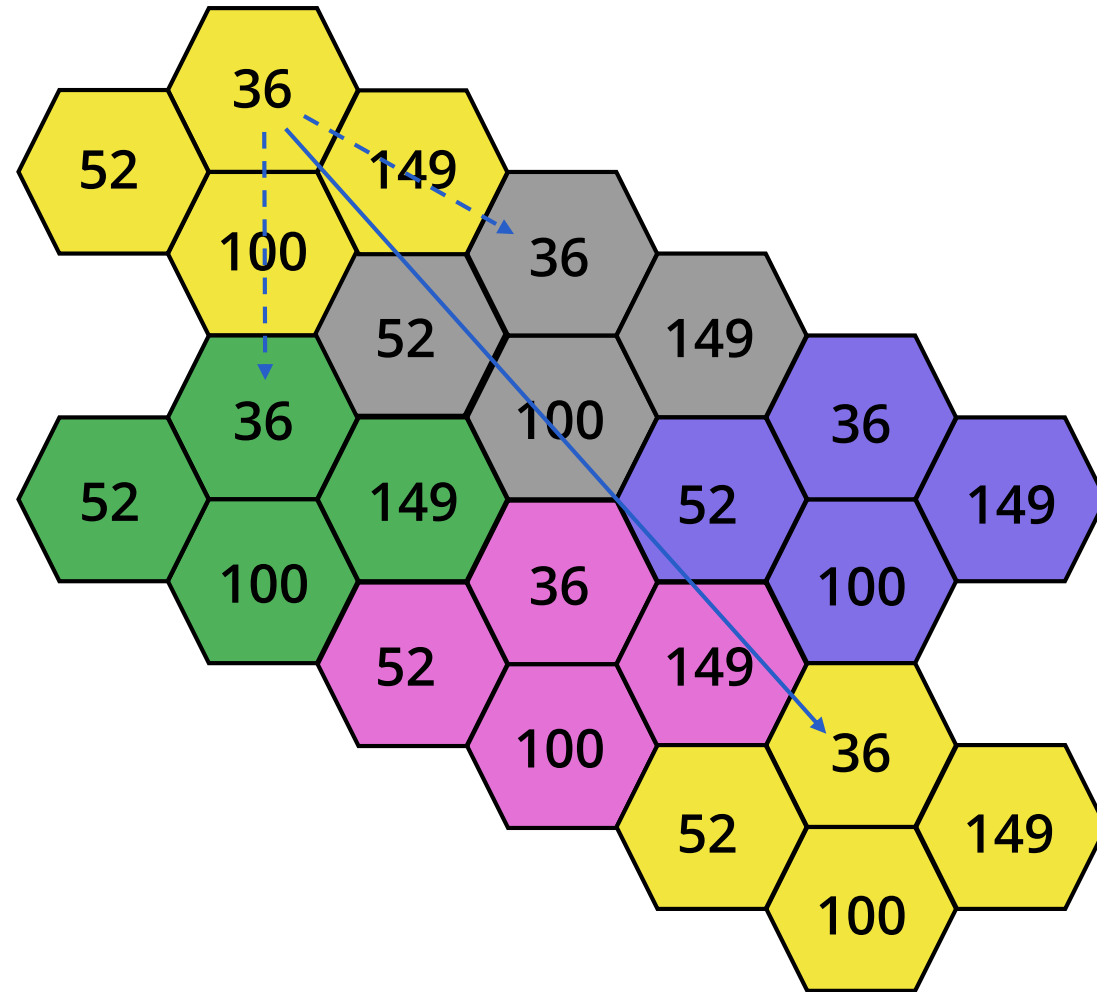


## OFDMA PDU Formats

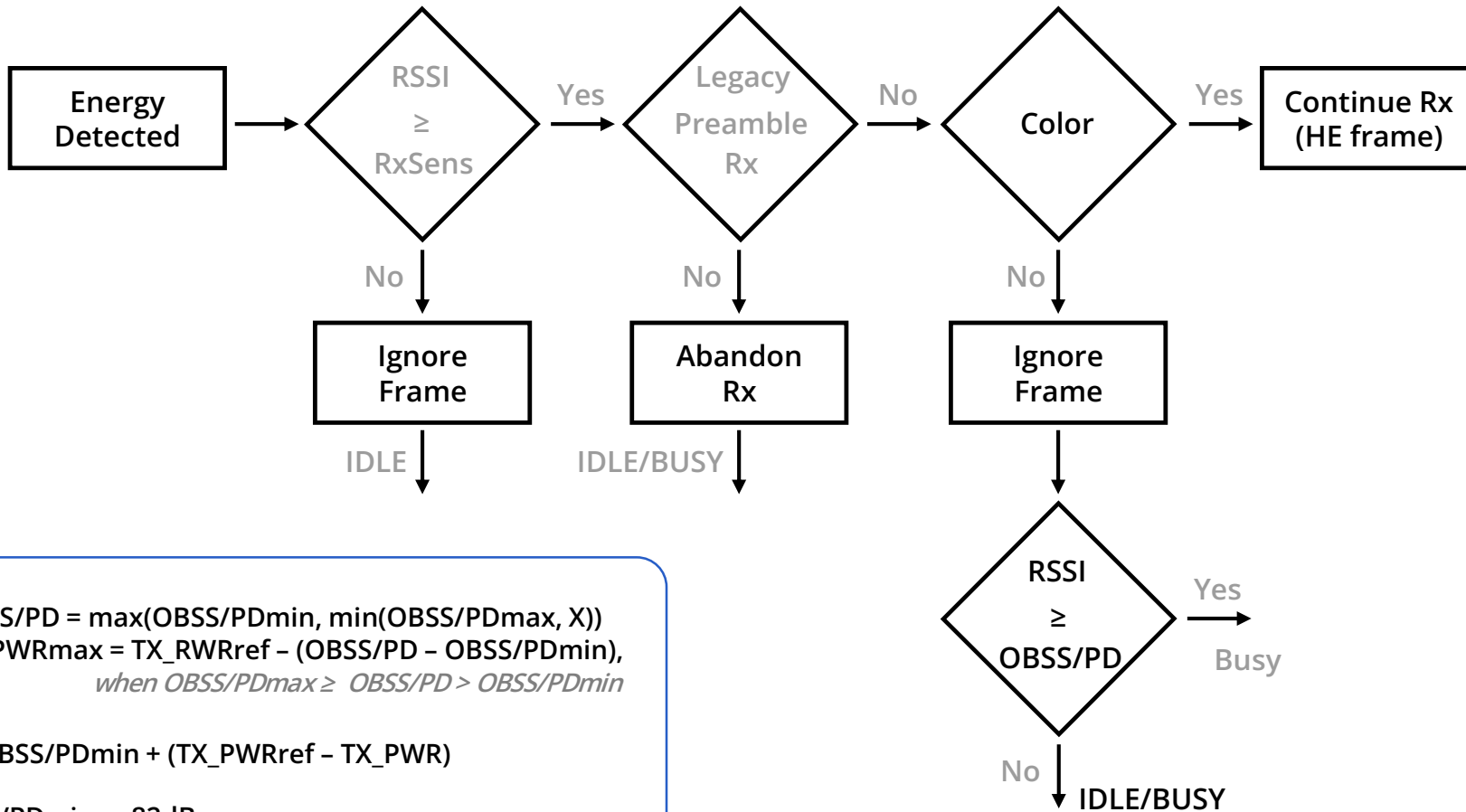
### 5 Formats for 802.11 ax (High-Efficiency Wireless)



# BSS Coloring



# BSS Coloring + Spatial Reuse



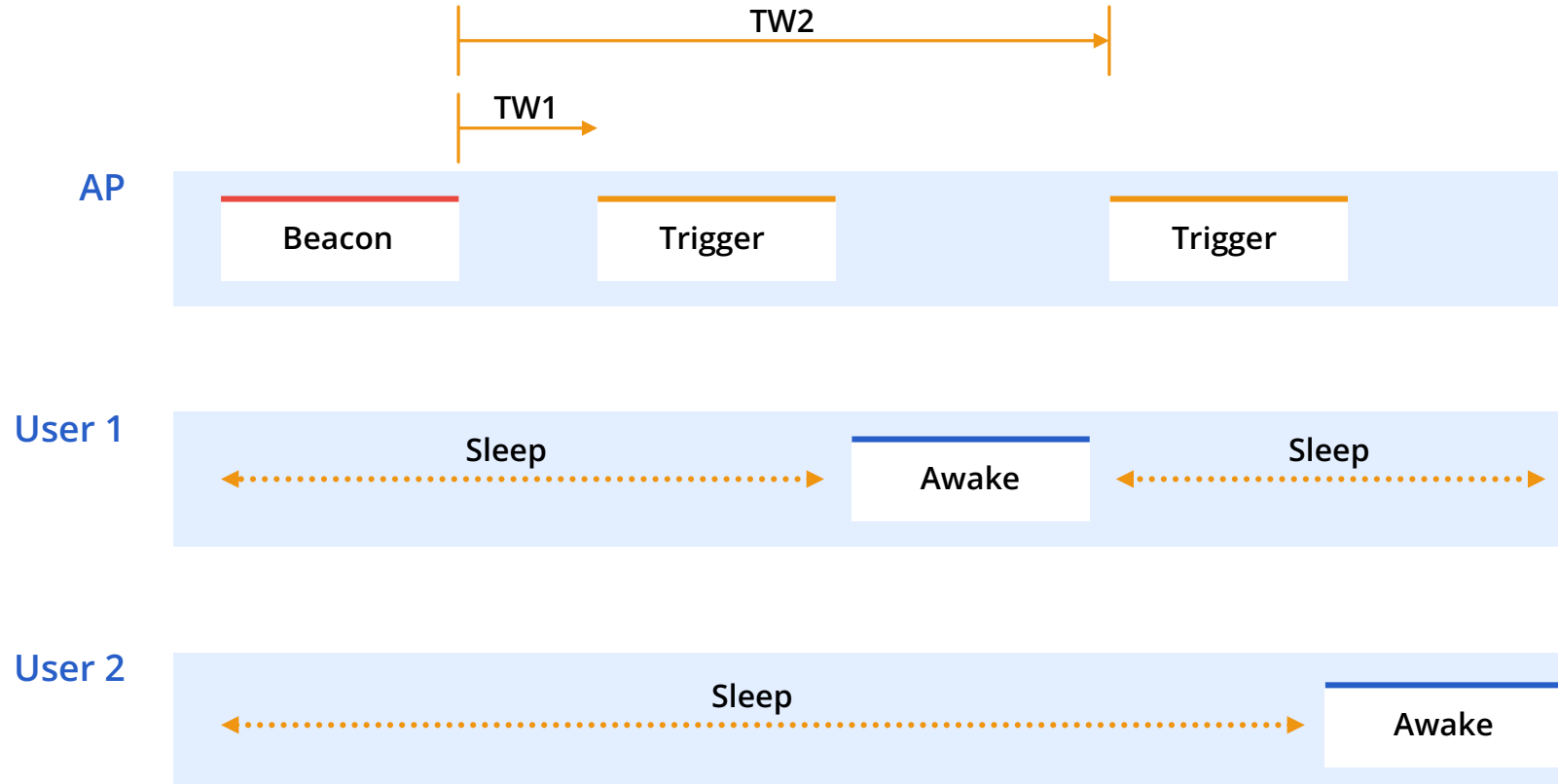
-  $OBSS/PD = \max(OBSS/PD_{min}, \min(OBSS/PD_{max}, X))$   
-  $TX\_PWR_{max} = TX\_RWR_{ref} - (OBSS/PD - OBSS/PD_{min})$ ,  
when  $OBSS/PD_{max} \geq OBSS/PD > OBSS/PD_{min}$

$X = OBSS/PD_{min} + (TX\_PWR_{ref} - TX\_PWR)$

$OBSS/PD_{min} = -82\text{dBm}$ ,  
 $OBSS/PD_{min} = -62\text{dBm}$ ,  
 $TX\_PWR_{ref} = 21\text{dBm}$  for STAs and APs with 1 or 2 SS



# TWT - Target Wake Time



# Спасибо за внимание!



**Мы всегда готовы к диалогу, разработке  
и доработке решений под ваше техническое задание**



630020, г. Новосибирск, ул. Окружная 29В  
09:00 — 18:00 (GMT+7)  
Понедельник - пятница



+7 (383) 274-10-01, 274-48-48  
[eltex@eltex-co.ru](mailto:eltex@eltex-co.ru); [eltex-co.ru](http://eltex-co.ru)