



Методы доступа OFDM и SC-FDMA. Структура сети LTE

Лохвицкий Михаил Сергеевич
(ИПК МТУСИ)

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

Преимущества метода OFDM

- способность противостоять сложным условиям в радиоканале, в первую очередь устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами;
- простая реализация методами цифровой обработки;
- возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала.

Недостатки метода OFDM

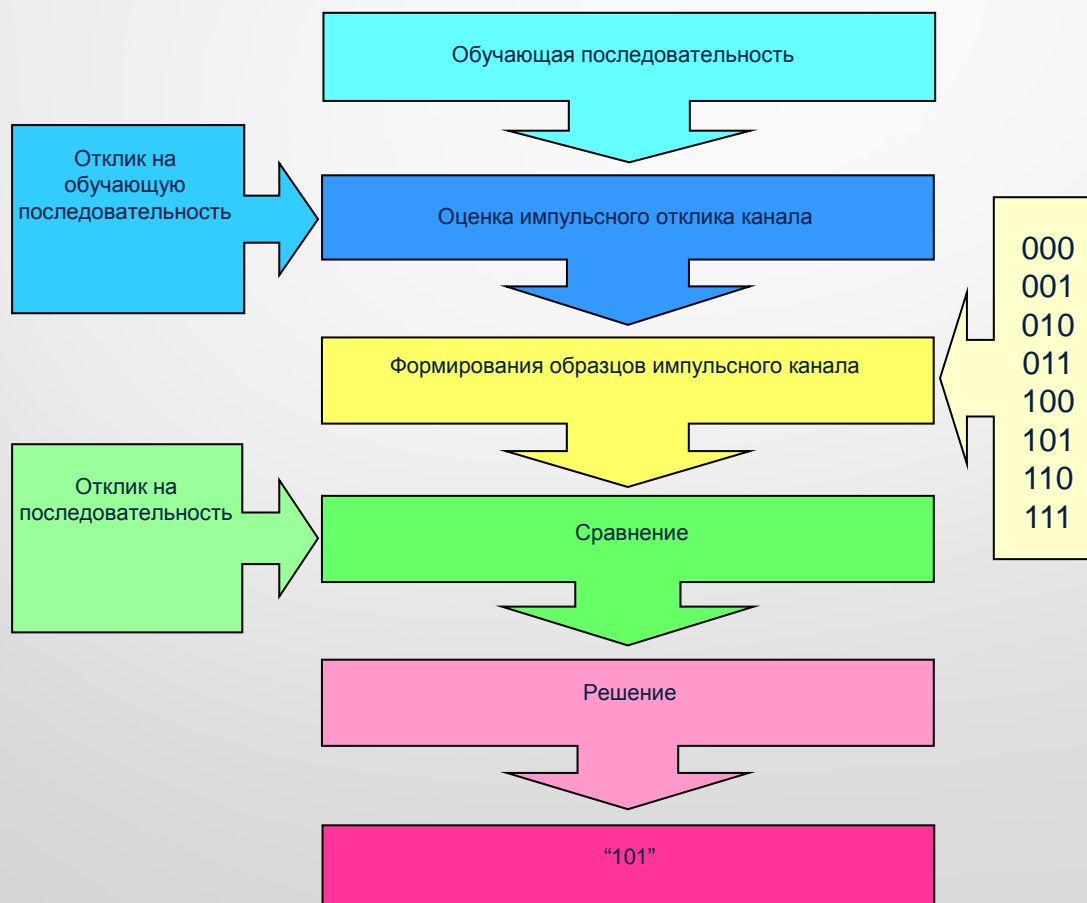
- необходима высокоточная синхронизация и по времени и по частоте


$$T_s = 1/(15000 \times 2048) \text{ с.} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

- использование защитных интервалов снижает эффективность метода;
- метод чувствителен к эффекту Доплера;
- технология характеризуется высоким уровнем пик-фактора, в линии вверх, что приводит к чрезмерным энергетическим затратам, поэтому там используется **SC-FDMA**.

Алгоритмы оптимального приёма сигнала в каналах с многолучёвостью

С многолучёвостью нужно не «бороться», а её использовать!





Вывод. При обработке больших массивов входных данных (N) необходимо провести сравнение с 2^N образцов откликов сигналов.

Можно сократить количество сравнений, используя алгоритм Витерби.

Расчёт длины защитного интервала

Пример. Пусть используется одна несущая, а скорость передачи $V = 100 \text{ Мбит/с}$,
При длительности импульса $T_{\text{и}} = 10^{-8} \text{ с}$.

Если время задержки прихода второго луча равно длительности импульса, то этот луч накладывается на следующий импульс. Разность хода лучей равна

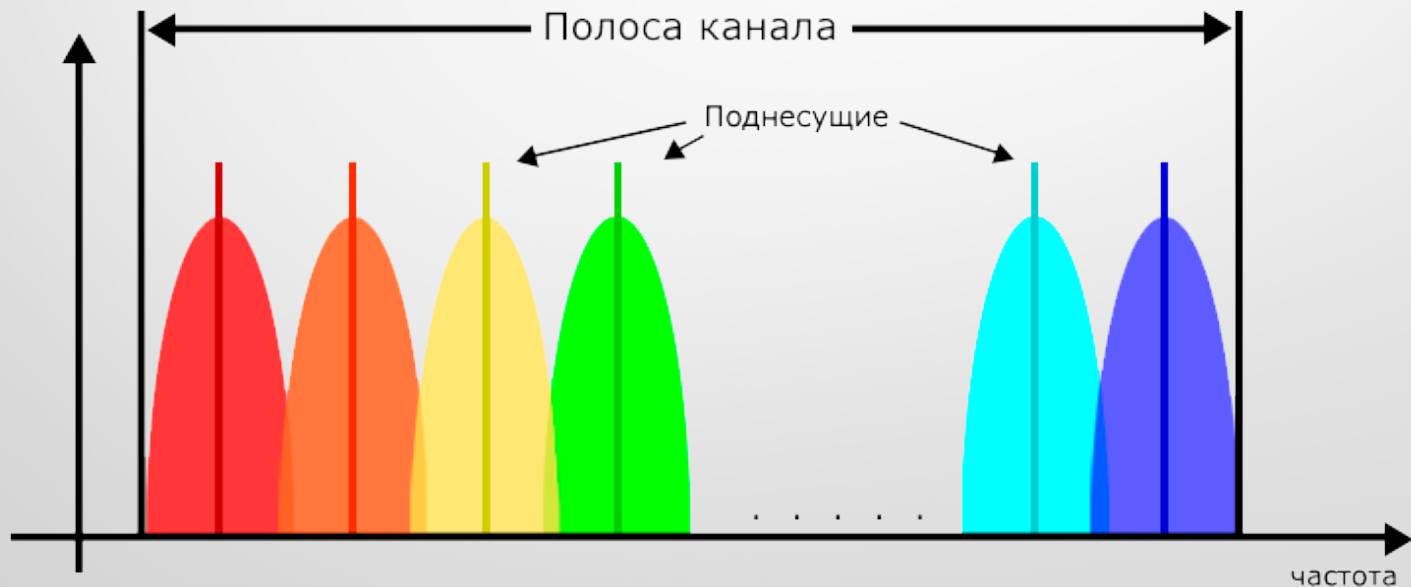
$$S = C \cdot T_{\text{и}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \text{м/с} \cdot 10^{-8} \text{ с} = 3 \text{ м}.$$

Если $T_{\text{и}} = 10^{-6} \text{ с}$, то $S = 300 \text{ м}$.

Если $T_{\text{и}} = 10^{-5} \text{ с}$, то $S = 3000 \text{ м}$.

Спектр OFDM сигнала

В методе мультиплексирования **OFDMA** входящий поток данных делится на несколько параллельных подпотоков с более низкой скоростью передачи (что приводит к увеличению длительности символа), а каждый подпоток модулируется и передается на своей ортогональной поднесущей.

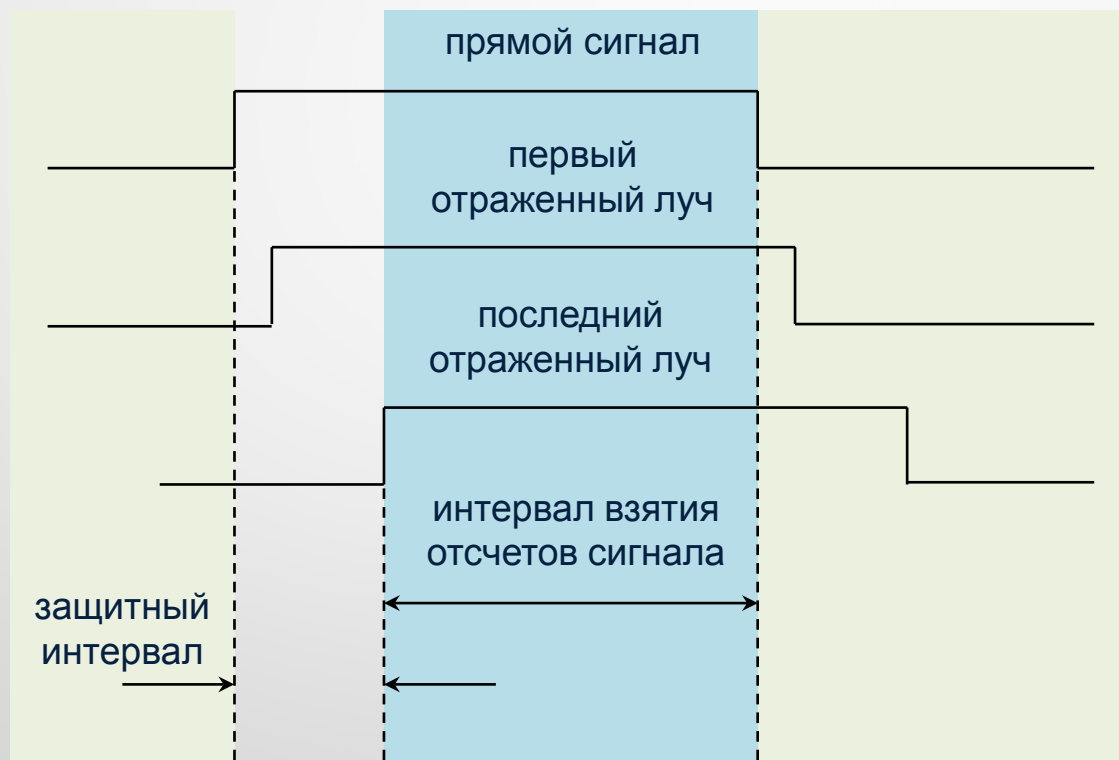


Ортогональность поднесущих позволяет на приёме выделить каждую поднесущую из суммарного сигнала даже в случае частичного перекрытия полос их спектров. Условием ортогональности поднесущих является равенство (1):

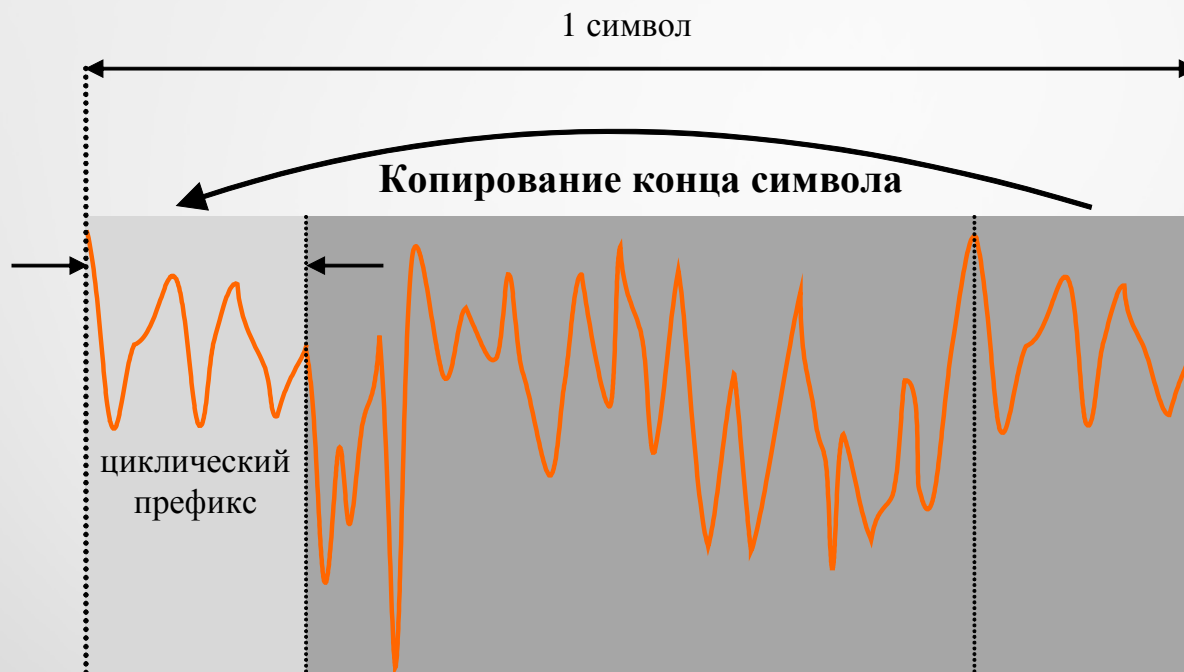
$$\Delta f = f_i - f_{i-1} = 1/T_{и} \quad (1)$$

Защитный интервал

Для повышения устойчивости сигнала к разбросу задержки в каждой поднесущей вводится защитный интервал T_g (за счёт уменьшения длительности символа OFDM)



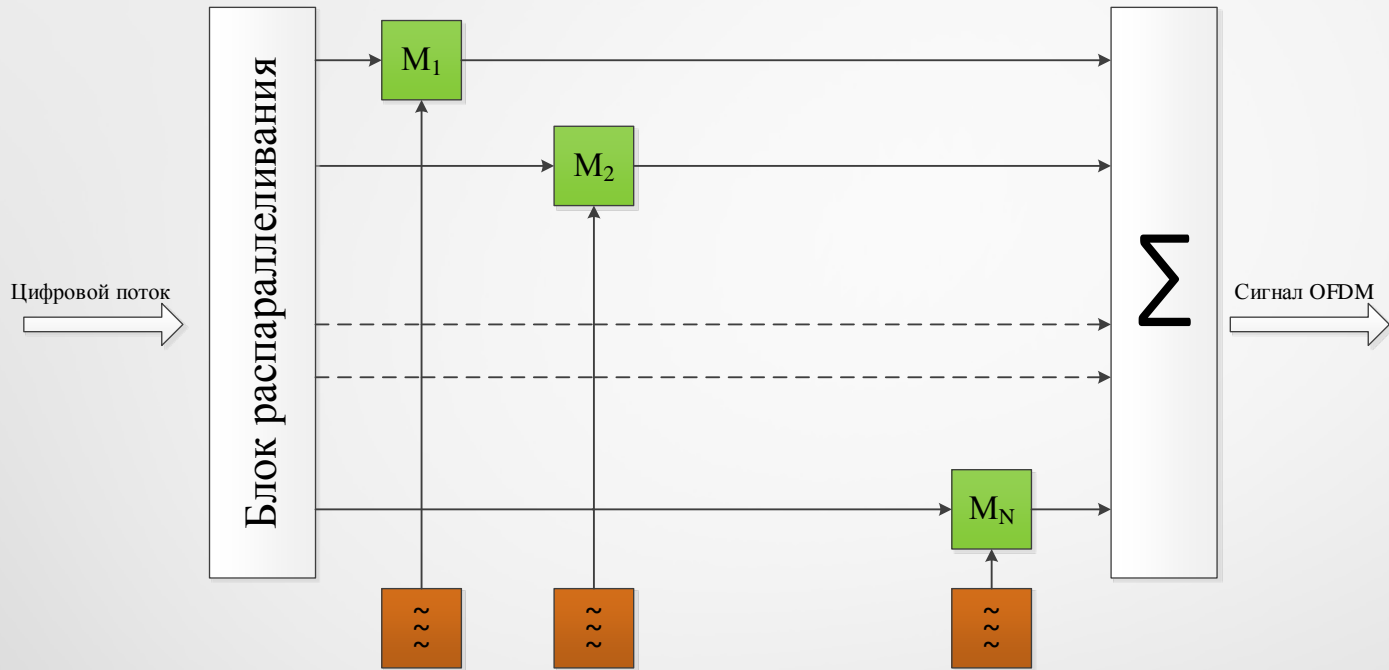
Циклический префикс



Характеристики циклического префикса в линии от базовой станции к мобильной.

Циклический префикс	нормальный		расширенный
	160 Ts	144 Ts	512 Ts
Продолжительность	5.2 мкс.	4.7 мкс.	16.7 мкс.
Соответствующая разность путей	1.6 км	1,4 км	5км
Процент префикса по отношению к длине символа	$160/2048=7,8\%$	$144/2048=7,0\%$	$512/2048=25\%$

Схема формирования сигнала OFDM (теория)

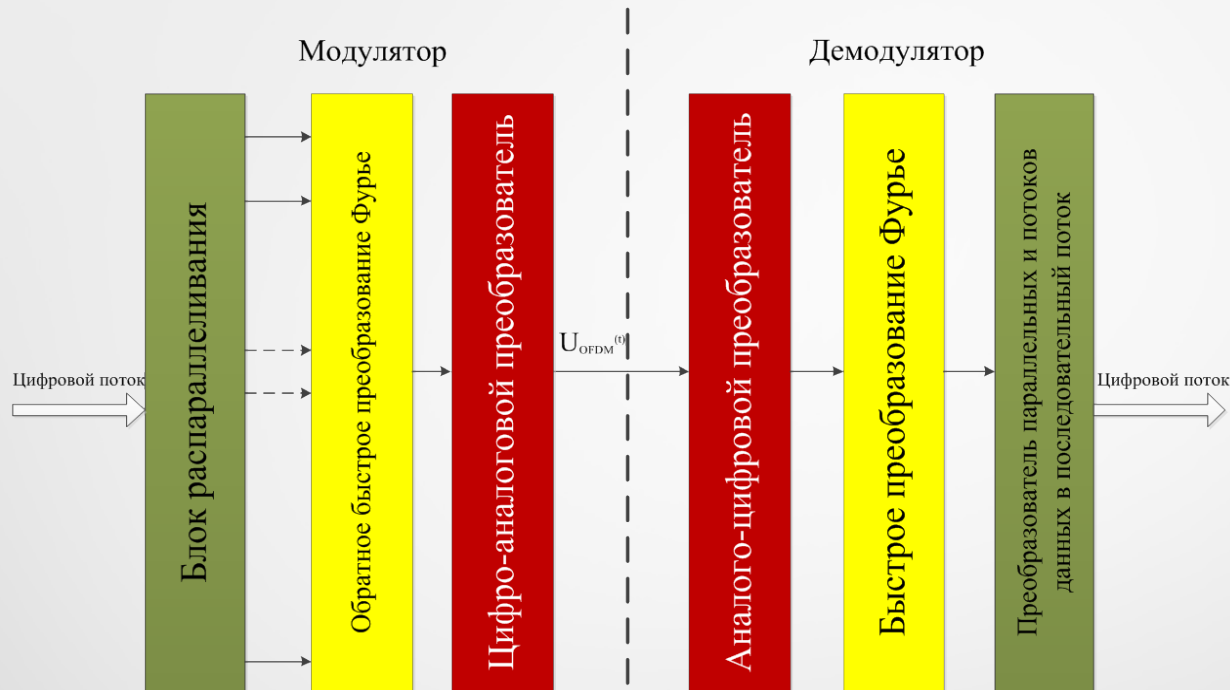


Формулы для обратного (1) и прямого преобразований Фурье (2).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i k n}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1; \quad (1)$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i k n}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Схема формирования сигнала OFDM

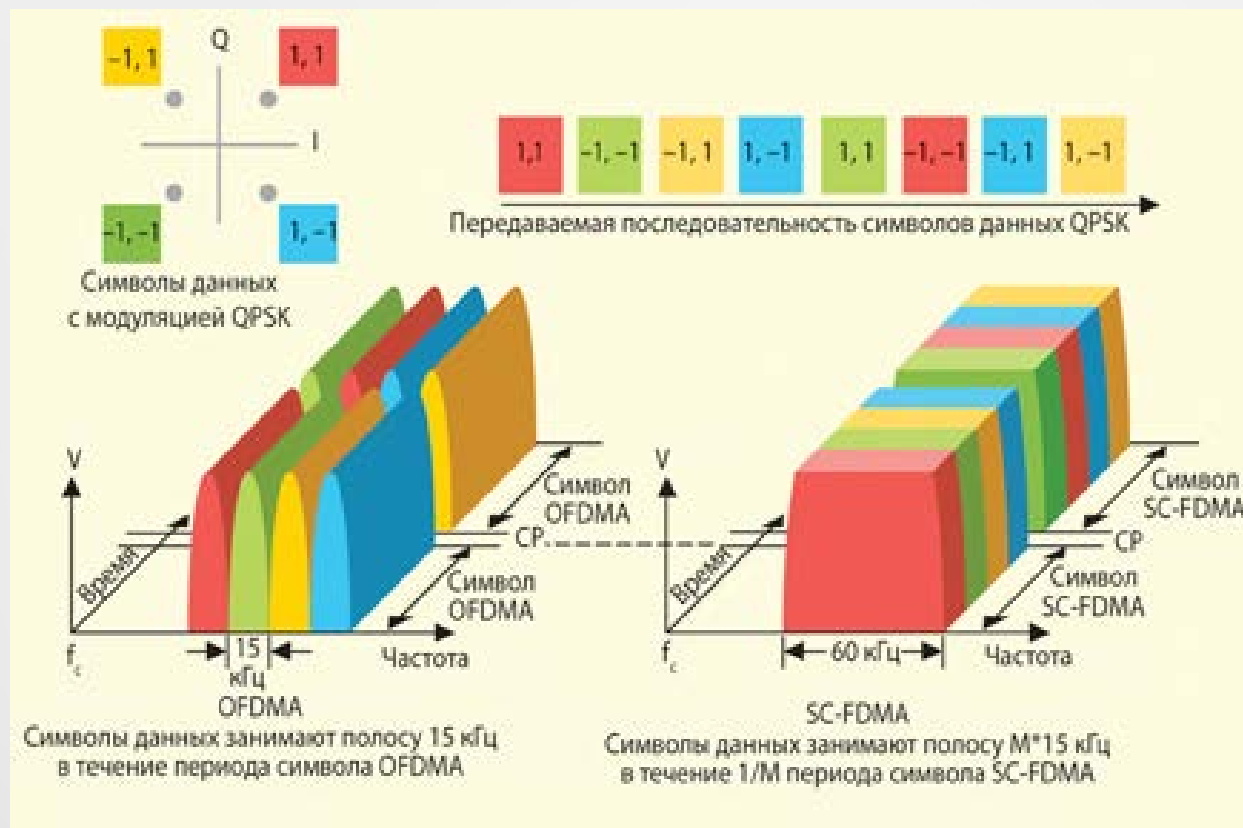


Для дискретного преобразования Фурье необходимо в реальном времени произвести N^2 вычислений, что затруднительно. Поэтому используют методы вычислительной математики, а именно быстрое преобразование Фурье. Это преобразование позволяет резко снизить объём вычислений (это особенно заметно при больших N) в случае, когда $N = 2^k$.

Метод доступа SC-FDMA

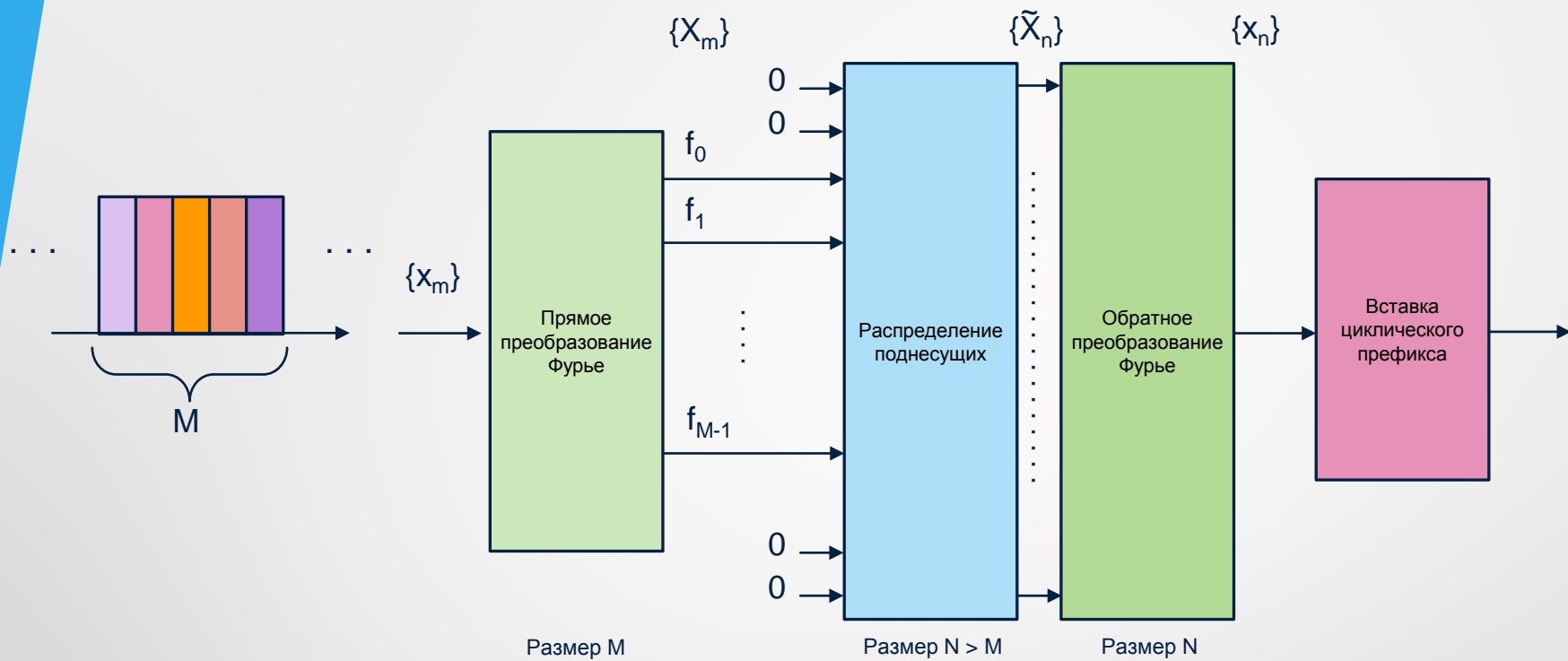
Так как в OFDM высокий пик-фактор (что не приемлемо для мобильных станций), то в LTE в линии вверх используется SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) – Множественный доступ с частотным разделением каналов с одной несущей частотой.

1. На интервале длительности символа в SC-FDMA (как и OFDM длительность символа равна $2048 T_s = 66,7$ мкс) модулированные символы данных передаются не одновременно на поднесущих частотах, а последовательно. Пусть M – количество поднесущих частот вверх, выделенных абоненту. Тогда длительность символа сокращают в M раз, при этом полоса частот расширяется в M раз. Т.е. модулированный символ занимает M поднесущих частот: $M \times 15$ кГц.
2. Модулированный сигнал подвергается прямому дискретному преобразованию Фурье.
3. Остальные преобразования совпадают с преобразованием в канале от базовой станции (т.е. с OFDM): распределение по поднесущим, обратное дискретное преобразование Фурье, вставка циклического префикса, преобразование с повышением частоты

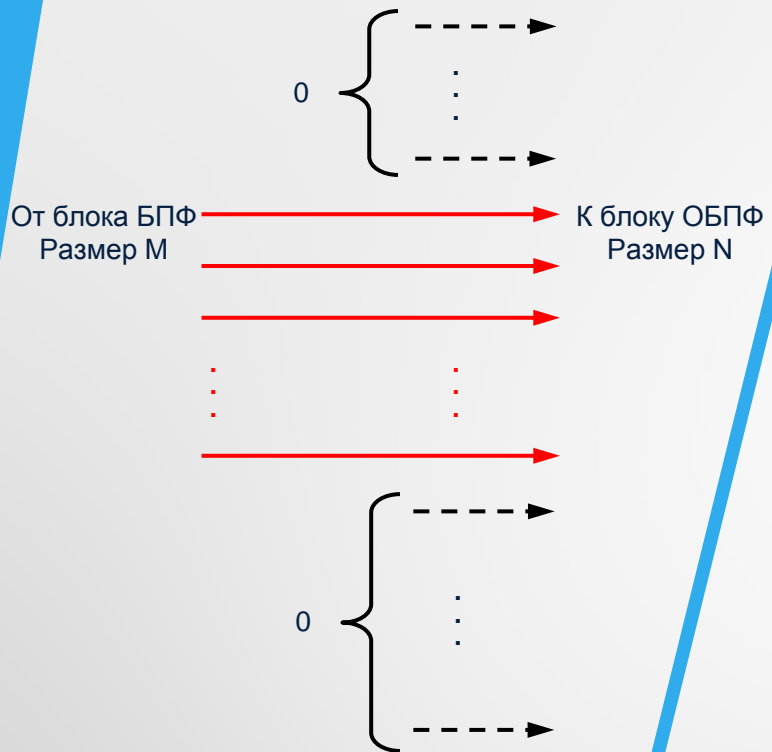


В примере $M = 4$ каждый модулированный сигнал передаётся на M поднесущих. Поэтому SC-FDMA правильнее называть «распределённым OFDM с дискретным преобразованием Фурье - DFT – S-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM)».

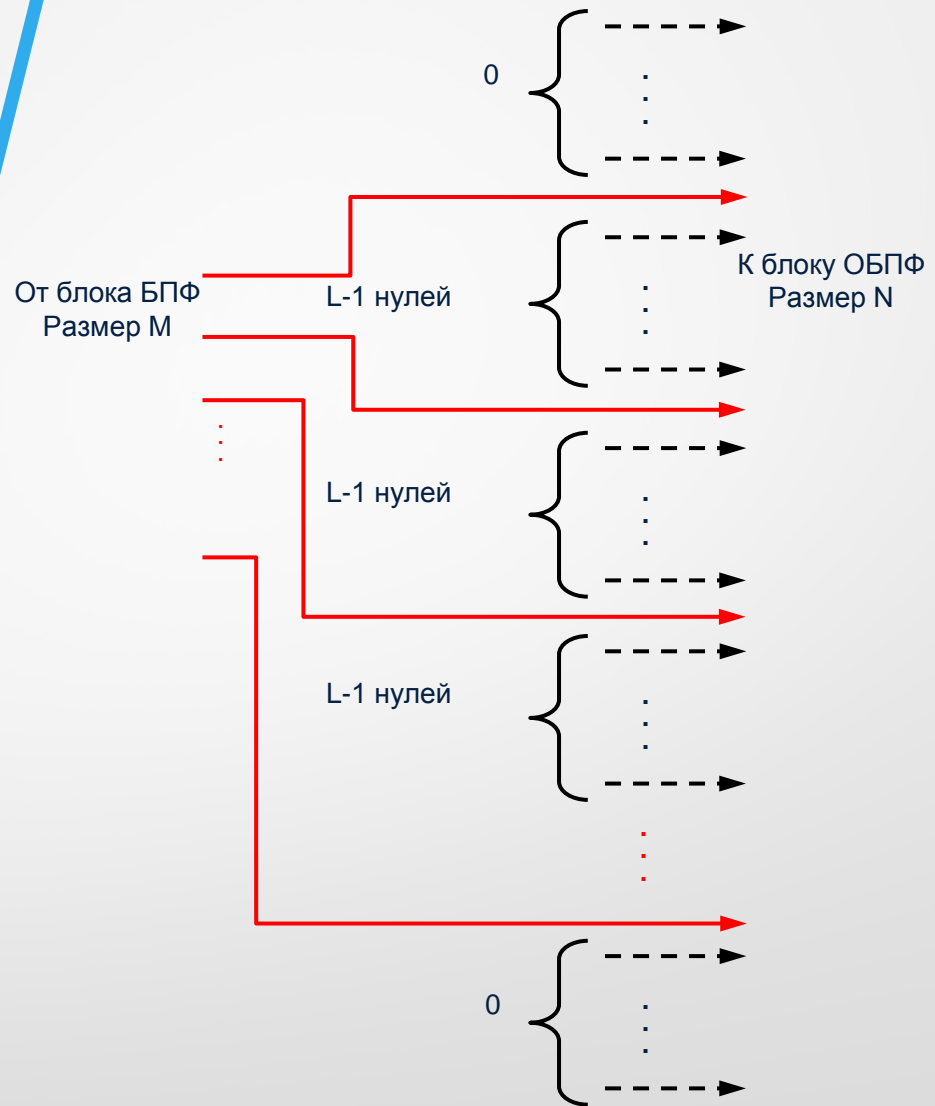




Так как мобильной станции выделено M поднесущих из N ($M < N$), а поток информации от этой мобильной станции необходимо «встроить» в общий восходящий поток, то к этому блоку из M сигналов перед обратным преобразованием Фурье добавляют $N-M$ нулей.

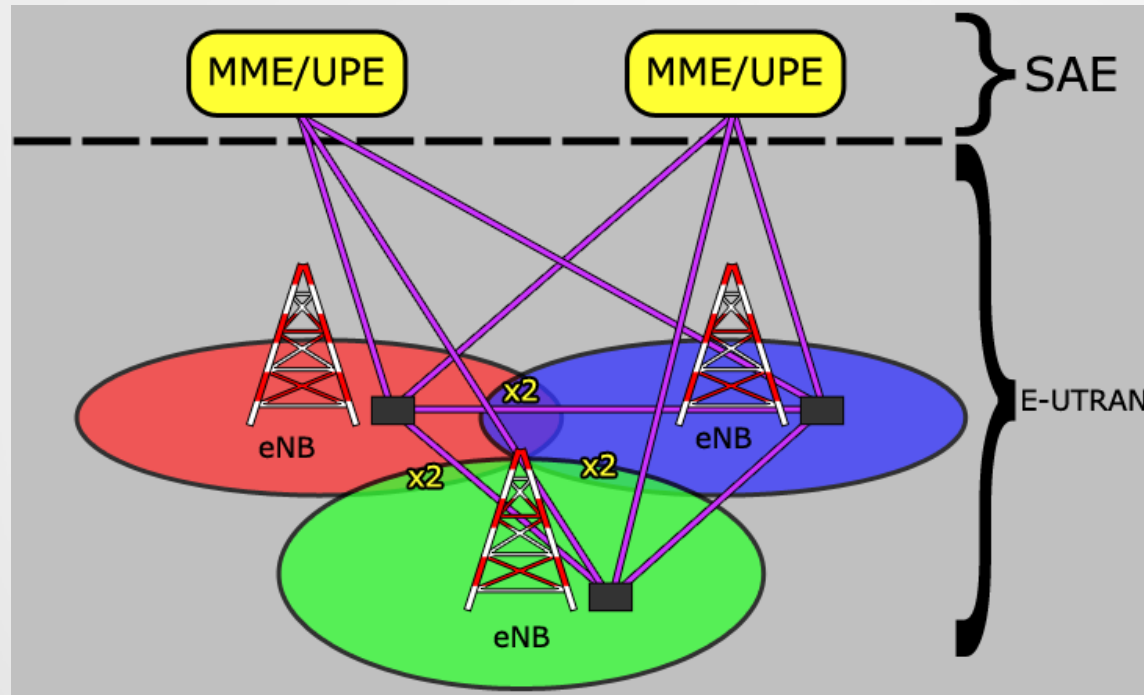


а



б

Структура сети LTE

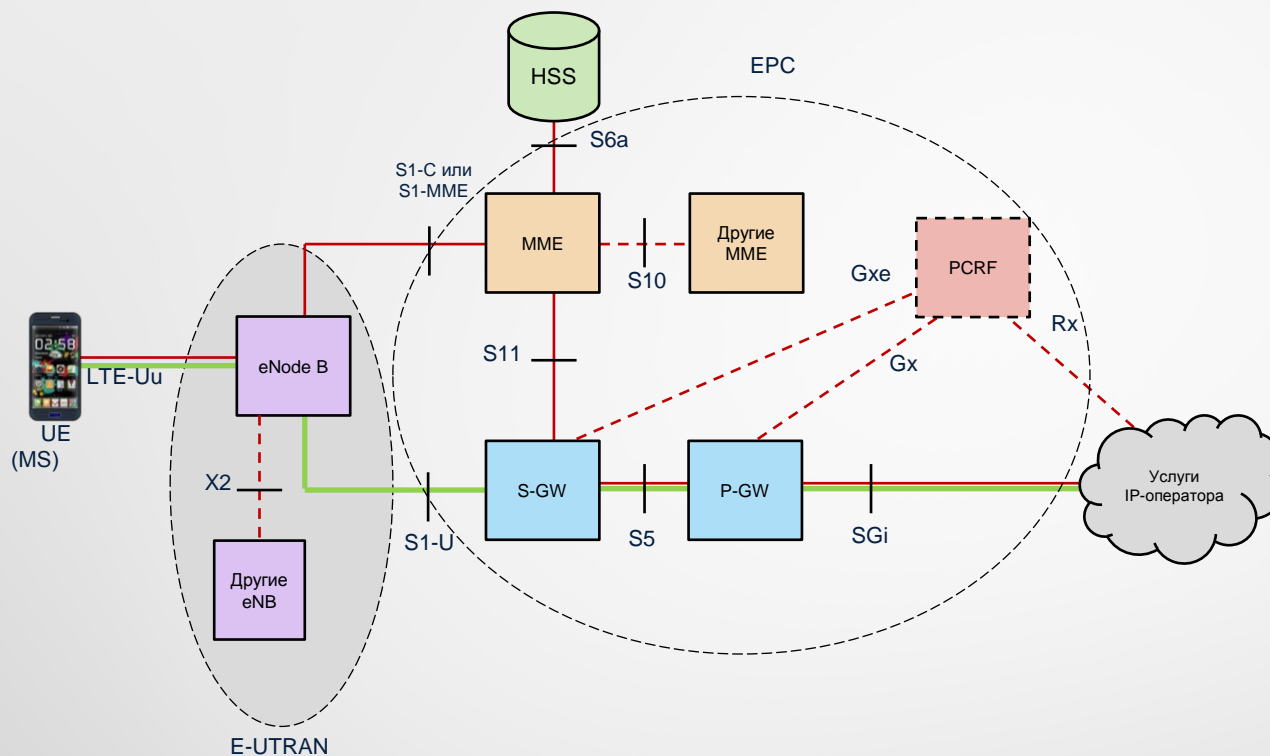


SAE - System Architecture Evolution – Усовершенствованная архитектура сети = (EPS – Evolved Packet System – усовершенствованная система передачи пакетов).

MME – Mobility Management Entity – Узел управления мобильностью сети SAE. Узел управляет протоколами плоскости управления.

UPE – User Plane Entity - Узел управления передачей данных пользователя. UPE обеспечивает работу протоколов сети SAE, это аналог VLR в сети GSM.

В LTE логически разделены сети передачи служебной информации, в частности сигнализации, и полезной информации пользователей.

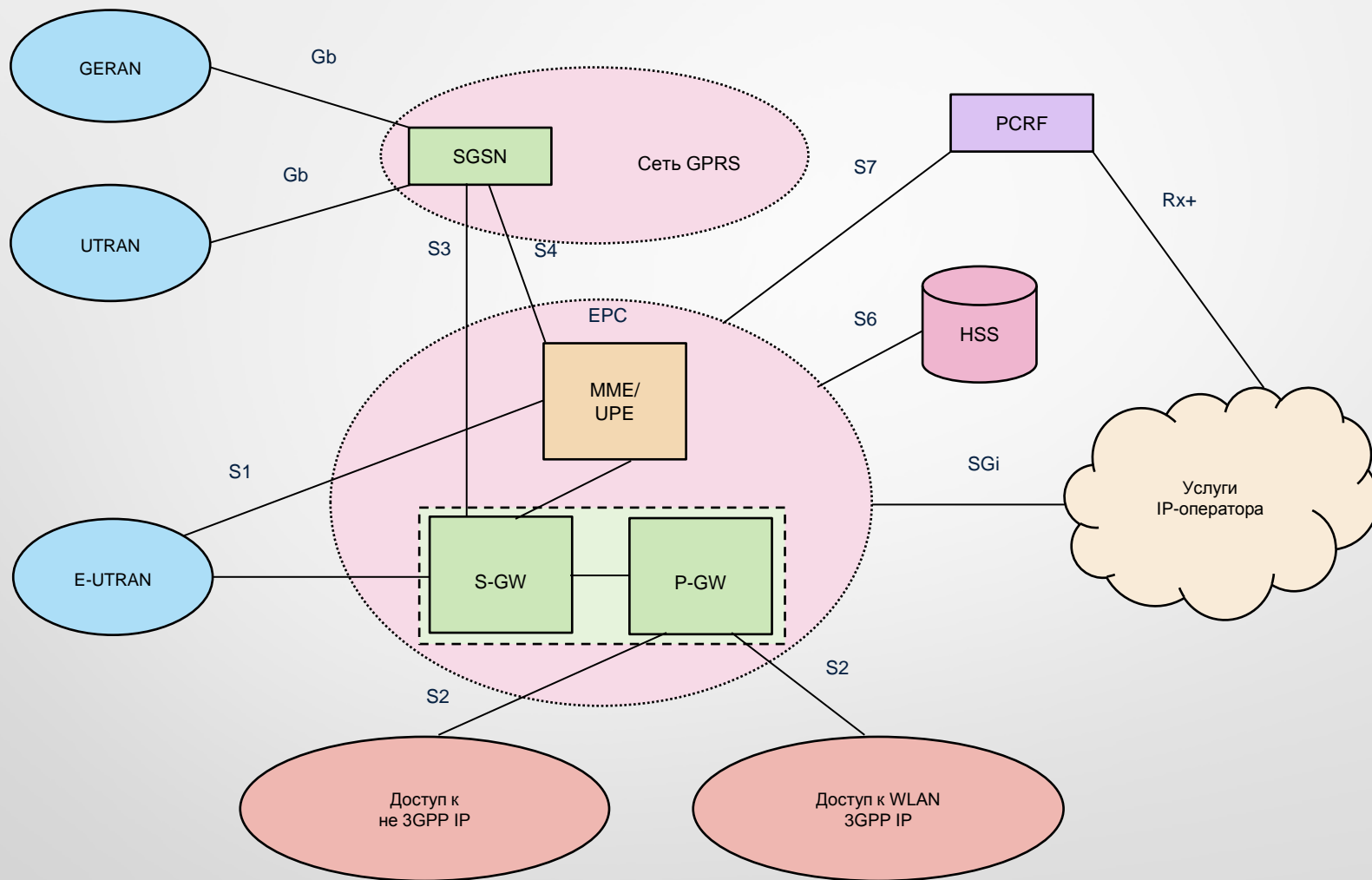


S-GW – Serving Gateway – обслуживающий шлюз служит для маршрутизации пакетов данных;

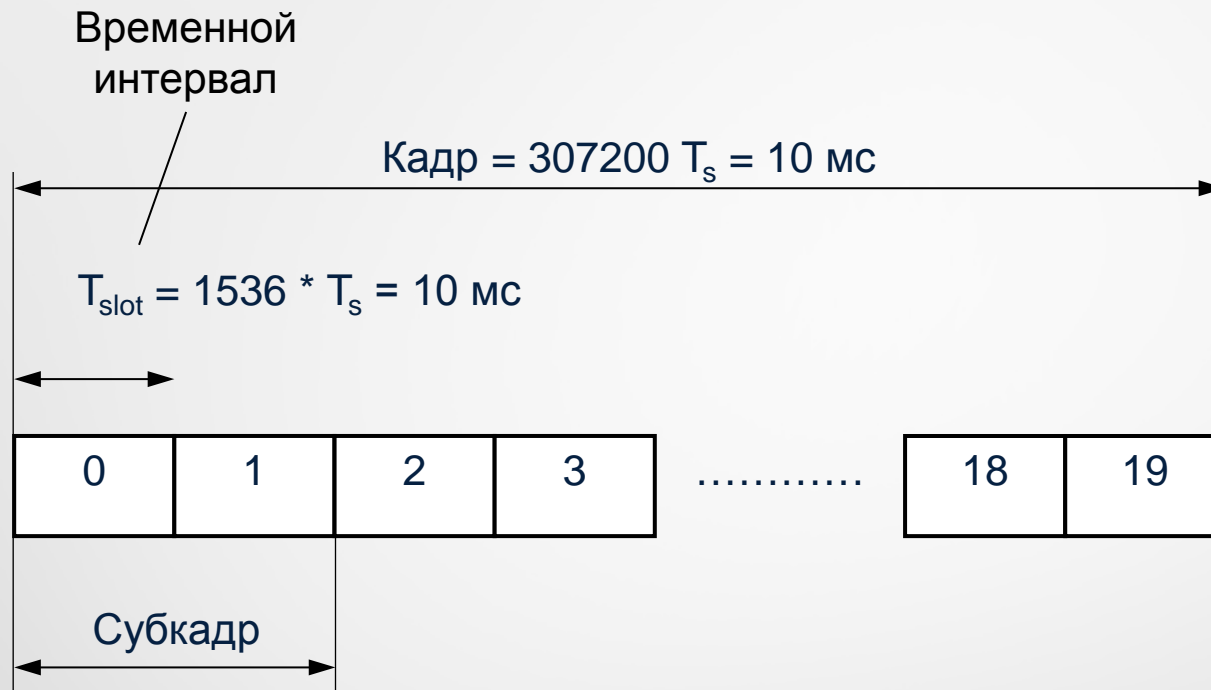
P-GW – Packet Gateway – пакетный шлюз используется для коммутации пакетов к внешним IP сетям. Для коммутации необходим IP адрес абонента;

EPC – Evolved Packet Core – усовершенствованное ядро для пакетной передачи – является опорной IP – сетью, обеспечивающей взаимосвязь различных мобильных сетей с пакетной передачей как между собой, так и с Интернет сетью.

Структура сети GSM/UMTS/LTE.

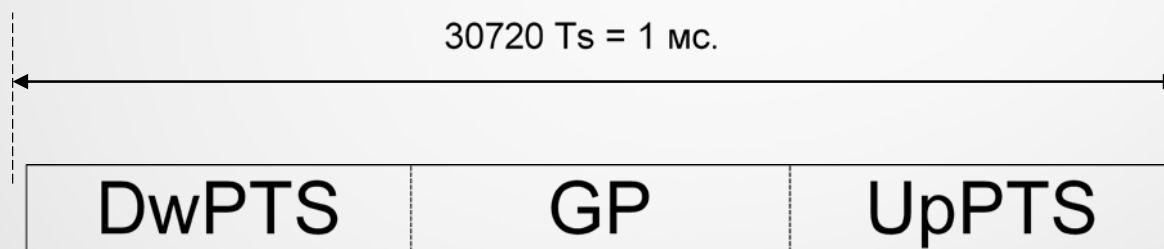


Структура кадра в LTE



В случае частотного дуплекса FDD все субкадры в линиях вверх и вниз имеют одинаковую структуру.

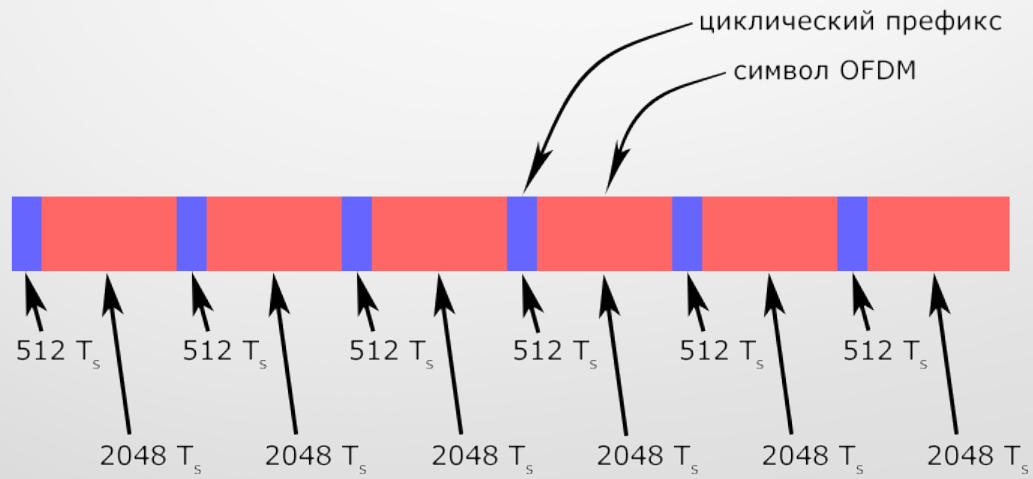
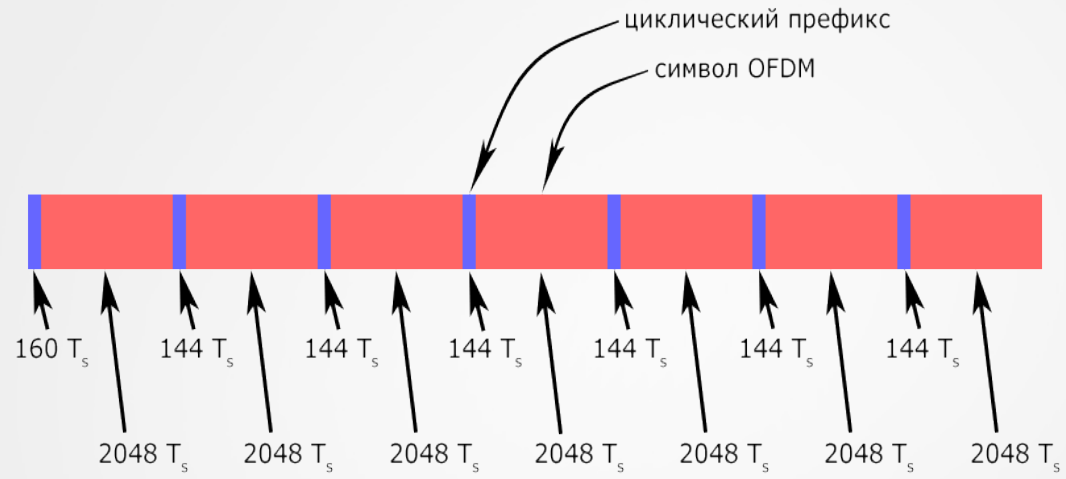
В случае временного дуплекса TDD одна и та же частота используется для передачи вверх и вниз, поэтому в части субкадров идёт передача вверх (U – uplink), а в части субкадров идёт передача вниз (D – downlink). Кроме того один субкадр (первый по номеру), а в некоторых конфигурациях ещё и шестой субкадр, заняты специальной информацией (S – special). Информация в специальных субкадрах разделена на три поля UpPTS, GP, DwPTS.



UpPTS – Uplink Pilot Time Slot – Интервал для передачи пилотного сигнала вверх;
GP – guard period – защитный интервал;
DwPTS – Downlink Pilot Time Slot – Интервал для передачи пилотного сигнала вниз.

Семь конфигураций структур кадра при временном дуплексе.

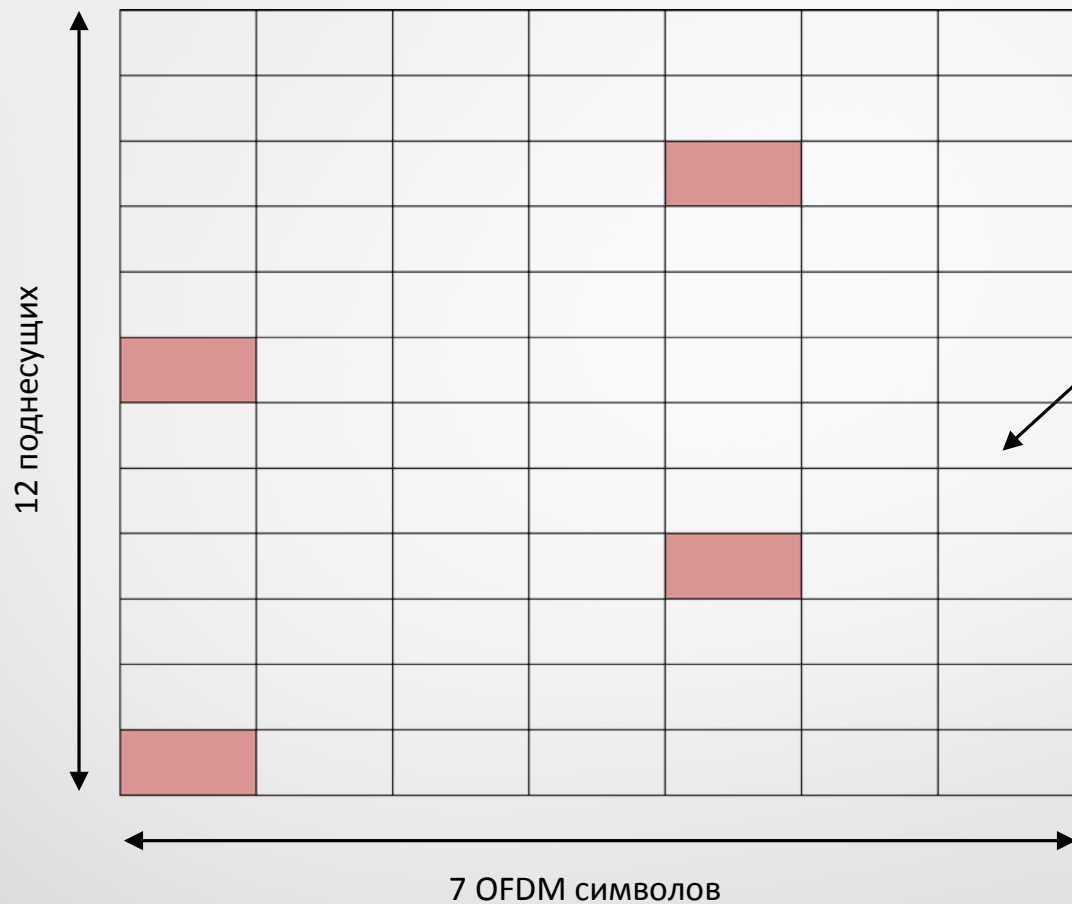
Номер конфигурации кадров	Периодичность повторения вверх-вниз	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D



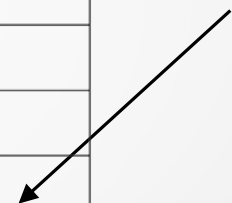
Частотно-временной ресурс: ресурсные блоки и ресурсные элементы

Один ресурсный блок состоит из 12 рядом расположенных поднесущих (12 поднесущих по 15 кГц = 180 кГц) и занимает во времени один временной интервал 0,5 мс.

В одном временном интервале на каждой поднесущей содержится 6 или 7 OFDM символов, в зависимости от продолжительности циклического префикса. Эти OFDM символы образуют ресурсные элементы (Resource Element – RE). Ресурсный элемент характеризуется двумя параметрами $(k; l)$, где k – номер поднесущей, l – номер символа в ресурсном блоке. Таким образом, при нормальном циклическом префиксе число ресурсных элементов в ресурсном блоке равно $12 \times 7 = 84$, а при расширенном префиксе равно $12 \times 6 = 72$.

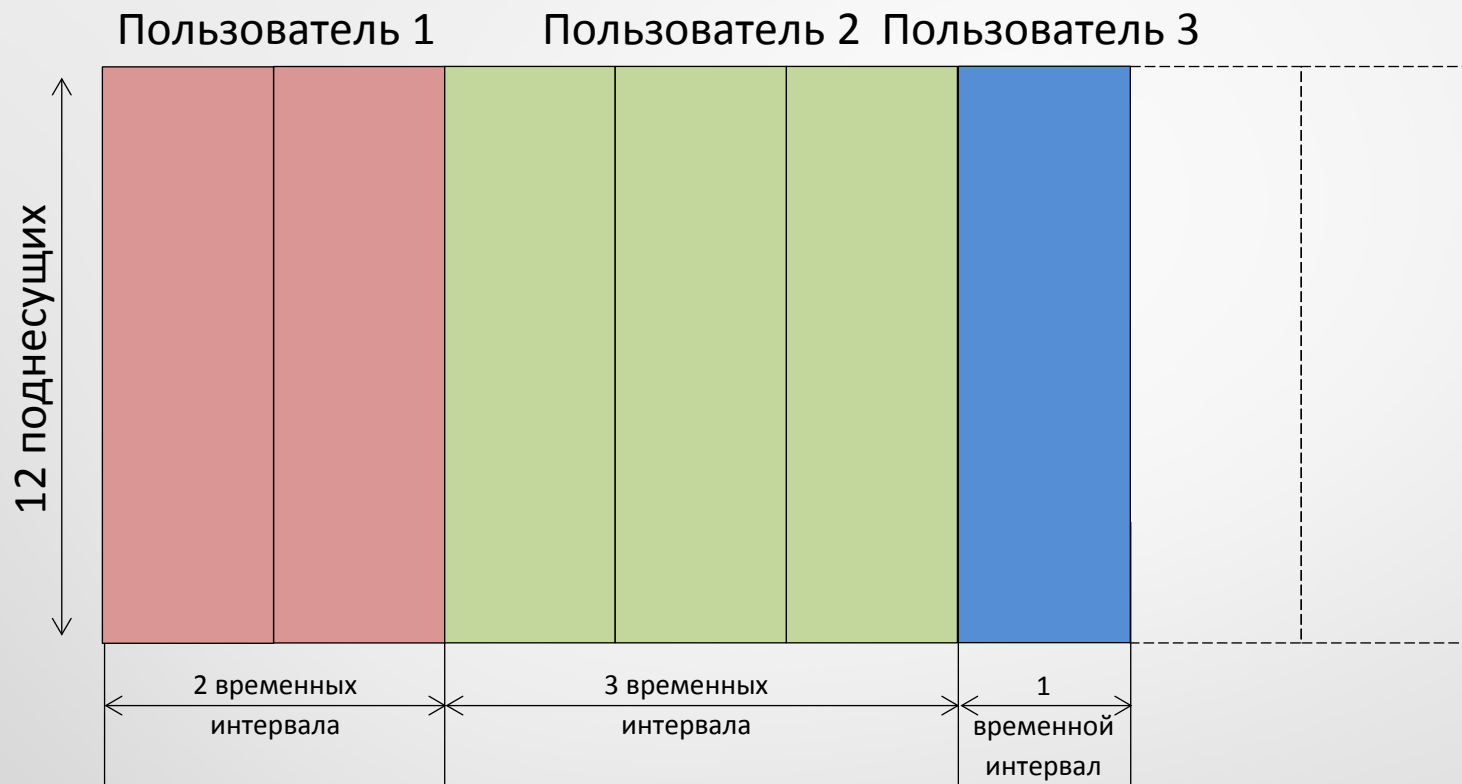


Ресурсный элемент



- передача пилотного (опорного) сигнала

Пример распределения ресурсов.



Число ресурсных блоков, число поднесущих и эффективная ширина полосы в зависимости от выделенной ширины канала.

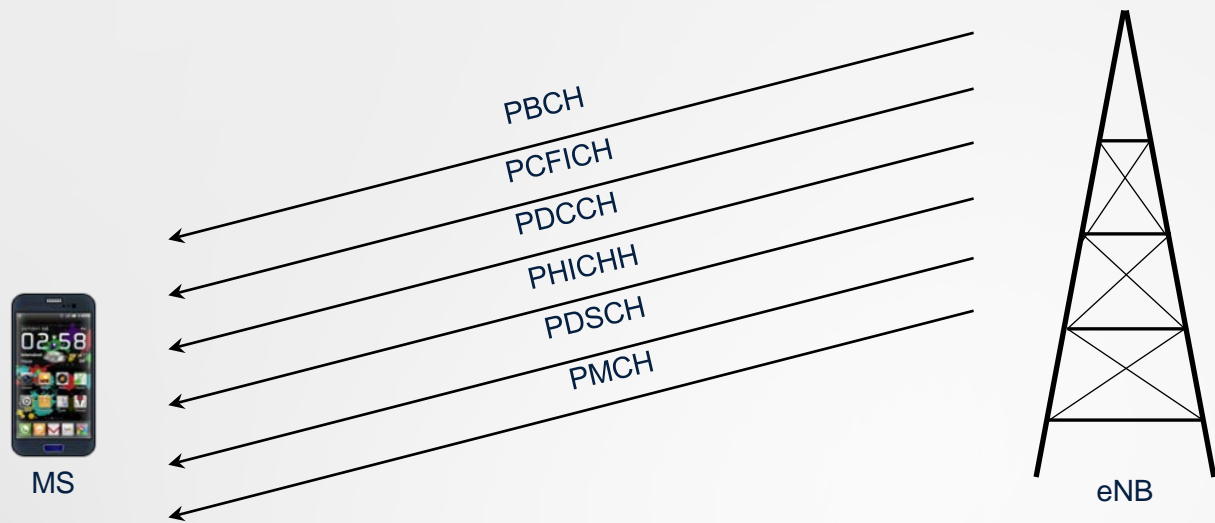
Ширина канала	1,4 МГц	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Эффективная ширина полосы линия вверх (МГц)	1,08	2,7	4,5	9,0	13,5	18,0
Эффективная ширина полосы линия вниз (МГц)	1,095	2,715	4,515	9,015	13,515	18,015
Количество символов OFDM в субкадре	14/12 (префикс нормальный / расширенный)					

Пиковые скорости передачи в зависимости от ширины канала, схемы модуляции и использования MIMO.

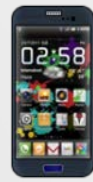
Ширина канала, МГц	Пиковая скорость передачи данных, Мбит/с					
	QPSK		16 QAM		64 QAM	
	Без MIMO	2*2 MIMO	Без MIMO	2*2 MIMO	Без MIMO	2*2 MIMO
1.4	1.83	3.55	4.9	7.1	5.5	10.6
3	5	8.9	9.17	17.7	13.76	26.6
5	7.6	14.8	15.3	29.6	22.9	44.7
10	15.3	29.6	30.6	59.1	45.9	88.7
15	22.9	44.4	45.9	88.7	68.8	133.1
20	30.6	59.1	61.2	118.3	91.7	177.4

Категории оборудования пользователя и их характеристики.

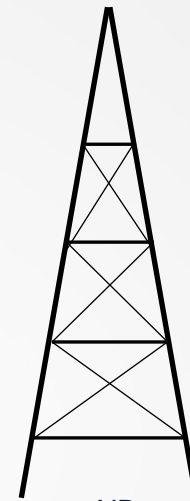
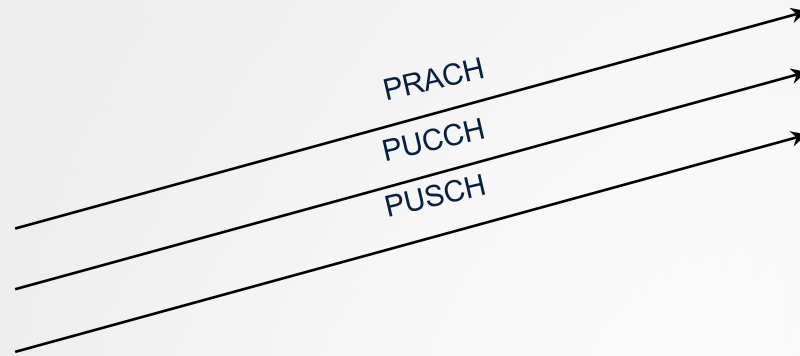
Номер категории оборудования пользователя (UE)	Максимальная скорость в нисходящем канале	Число потоков в нисходящем потоке (MIMO)	Максимальная скорость в восходящем потоке	Возможность использования модуляции 64 QAM в восходящем потоке
1	10.3 Мбит/с	1	5.2 Мбит/с	Нет
2	51.0 Мбит/с	2	25.5 Мбит/с	Нет
3	102.0 Мбит/с	2	51.0 Мбит/с	Нет
4	150.8 Мбит/с	2	51.0 Мбит/с	Нет
5	302.8 Мбит/с	4	75.4 Мбит/с	Да



- PBCH (Physical Broadcast Channel) – физический широковещательный канал, используется как несущий для транспортного канала BCH;
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) – физический канал управления для передачи формата, используется для индикации числа символов OFDM, используемых в физическом канале PDCCH;
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) – физический канал управления вниз, используется для передачи карт размещения каналов и грантов в линиях вверх и вниз;
- PHICH (Physical HARQ Indicator Channel) – физический канал для индикации HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest – Гибридный (метод исправления ошибок с использованием ARQ) автоматический запрос на повторную передачу пакетов);
- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) – физический канал вниз с разделением пользователей, используется как несущий для транспортного канала DL – SCH.



MS



eNB

- PRACH (Physical Random Access CHannel) – физический канал запроса случайного доступа;
- PUSCH (Physical Uplink Shared CHannel) – физический канал вверх с разделением пользователей, используется как несущий для транспортного канала UL-SCH;
- PUCCH (Physic Uplink Control CHannel) – физический канал вверх передачи управляющей информации UCI (Uplink Control Information), используется, когда отсутствует канал PUSCH.

The image features a decorative graphic in the bottom-left corner consisting of several overlapping, parallel lines in various shades of blue, extending from the bottom-left towards the center of the frame. The main text is centered horizontally and vertically on a light gray background.

Спасибо за внимание!