Практическая работа №3

Системы связи с технологией OFDM.
Системы связи с технологией расширения спектра

Необходимость выполнения работы: Для повышения эффективности систем связи разрабатываются различные технологии. В данной работе рассматриваются две наиболее популярные технологии – OFDM и DSSS.

Цель работы: Произвести расчет параметров системы связи с технологией OFDM и с технологией формирования шумоподобного сигнала DSSS.

Часть 1. Применение технологии OFDM. Расчет параметров OFDM-сигнала

Несмотря на то, что OFDM дословно расшифровывается как (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) мультиплексирование с ортогональным частотным разделением, его относят к методам цифровой модуляции. Хотя на самом деле OFDM лучше представлять не как метод модуляции, а как технологию (новый принцип передачи сигналов). Дело в том, что в OFDM заключены одновременно и модуляция и мультиплексирование, но мультиплексирование особенное. Обычное мультиплексирование подразумевает объединение различных сигналов от разных источников, здесь же происходит объединение составных частей одного и того же сигнала.

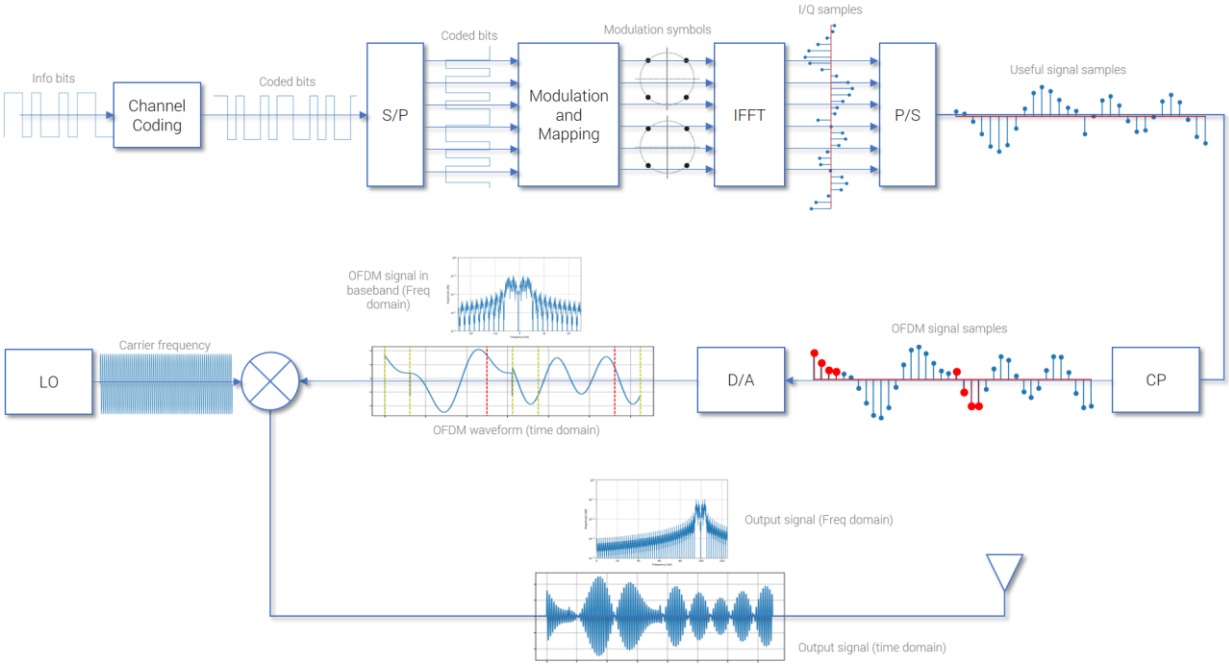


Рисунок 1 – Схема OFDM-модулятора

При OFDM на каждой из поднесущих может передаваться сигнал со своим форматом модуляции (QAM, QPSK и др.) в зависимости от требований к скорости передачи, погодных условий и уровня помех в канале. Таким образом, OFDM выступает не как альтернатива модуляции QAM, QPSK и другим форматам, а как дополнение к ним, к формированию сигнала более устойчивого к помехам и искажениям. Прежде чем формировать OFDM-сигнал мы сначала должны сформировать символы QAM, BPSK или другого вида модуляции.

Рекомендуемые к прочтению статьи и учебные пособия по теме:

Зачем была придумана и используется технология OFDM
1) Статья №1
2) Статья №2
3) Практический курс National Instruments «Основы передачи ВЧ сигналов»

OFDM сигнал во времени характеризуется через длительность (OFDM-символ), а в частотной области OFDM сигнал характеризуется числом поднесущих, из которых собственно во временной области и формируется OFDM-символ (рисунок 2 и рисунок 3).

Требуемое разнесение по частоте стандартов LTE и GSM, работающих в общей полосе частот.

Полоса частот, занимаемая системой LTE	Разнесение по частоте
10 МГц (50 ресурсных блоков)	5 МГц
5 МГц (25 ресурсных блоков)	2.5 МГц
3 МГц (15 ресурсных блоков)	1.6 МГц
1.4 МГц (6 ресурсных блоков)	0.8 МГц

Ресурсная сетка LTE при стандартном шаге поднесущих $\Delta f = 15$ кГц

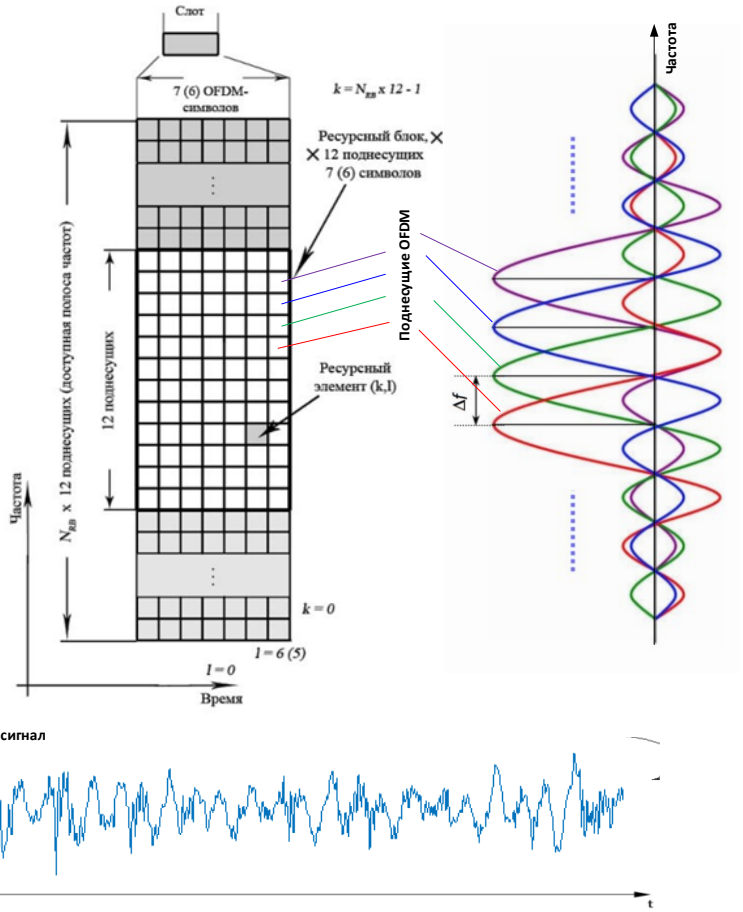


Рисунок 2 – Ресурсный блок

OFDM – одна из разновидностей частотного мультиплексирования, в котором единственный канал использует кратные поднесущие на смежных частотах. Кроме того, поднесущие в системе OFDM накладываются, чтобы увеличить спектральную эффективность. Обычно, перекрытие на соседние каналы может вызывать взаимную интерференцию. Однако поднесущие в системе OFDM точно ортогональны к друг другу, поэтому они накладываются без интерференции. В результате системы OFDM позволяют увеличить спектральную эффективность, не вызывая интерференции в соседних каналах.

Формирование OFDM-сигнала

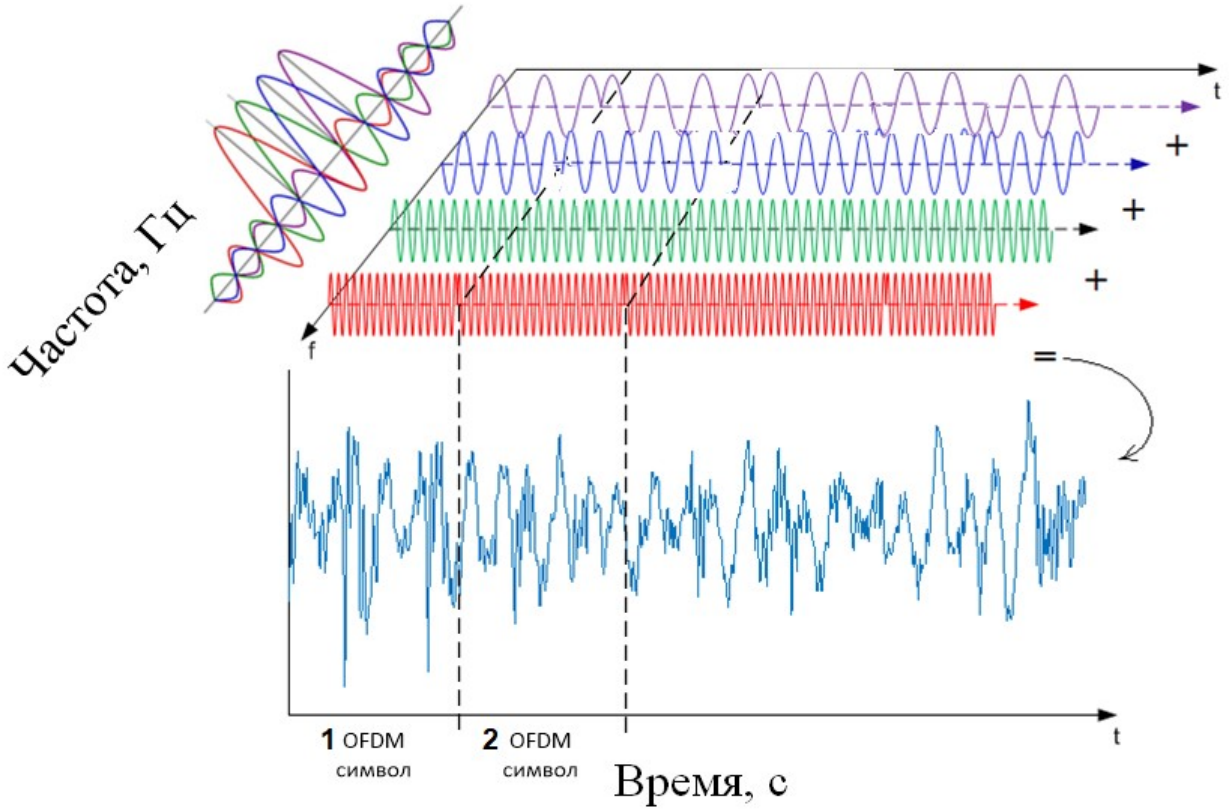


Рисунок 3 – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Изображенный на рисунке 3 OFDM-сигнал в baseband области можно представить выражением, в котором гармонические сигналы представлены комплексной экспоненциальной функцией:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{k=1}^{N_{FFT}} d_k \cdot \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N_{FFT}}\right) \qquad (1)$$

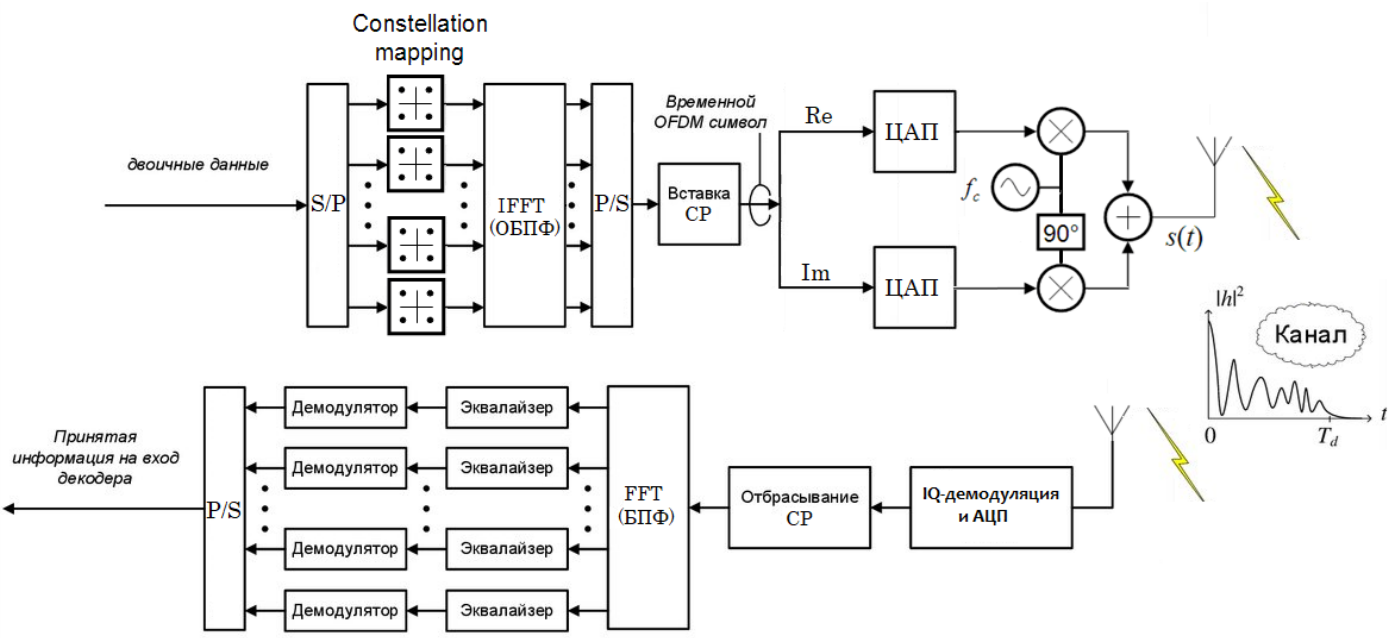
$$f_k = k\Delta f, \quad \Delta f = \frac{1}{T_s}, \quad N_{FFT} = \frac{T_s}{\Delta t}$$

d_k – информационный символ, передаваемый на k–й поднесущей,

n – дискретное время,

N_{FFT} – число точек БПФ.

Задание 0 - бонусное. Сравните выражение (1) с формулой ОБПФ (IFFT), разберитесь с технологией OFDM и объясните какую роль выполняет IFFT при формировании OFDM-сигнала.

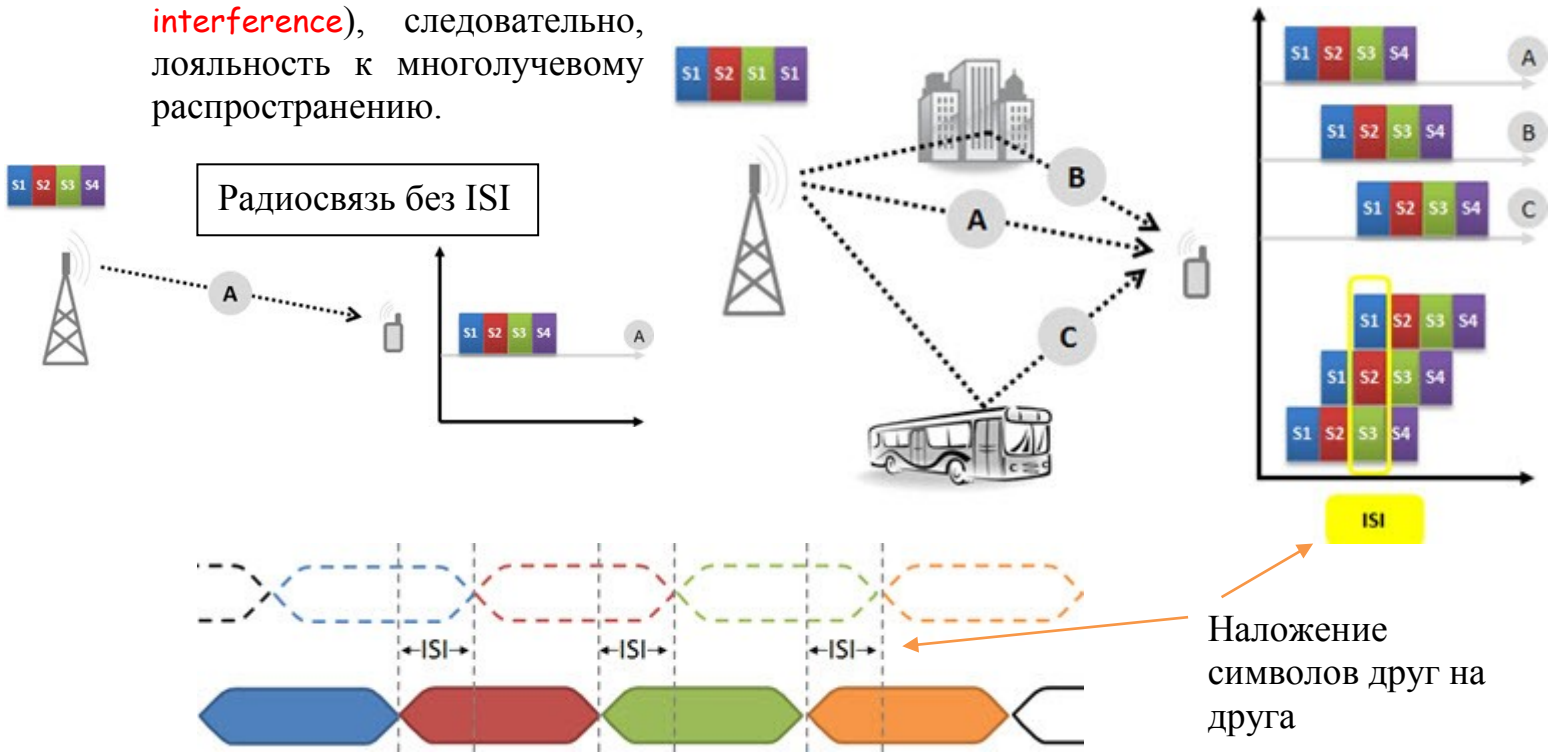


Плюсы технологии OFDM:

1. Высокая эффективность использования радиочастотного спектра благодаря почти прямоугольной форме огибающей спектра OFDM-сигнала при большом количестве поднесущих.

2. Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки (упрощение за счет использования IFFT).

3. Хорошее противостояние межсимвольным помехам (ISI - intersymbol interference), следовательно, лояльность к многолучевому распространению.



4. Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Минусы технологии OFDM:

1. Необходима высокая синхронизация частоты и времени.
2. Несовершенство современных приемников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы.
3. Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность.

Несмотря на некоторые недостатки, OFDM является отличным решением для архитектур современных мобильных сетей, работающих в условиях городской среды мегаполиса, а также для беспроводных сетей доступа Wi-Fi внутри зданий.

Расчет параметров OFDM сигнала

Задание 1 Произвести расчет параметров системы связи с технологией OFDM, используя описанную далее методику.

Вариант N берется такой же, как в практической работе №1 (для студентов заочной формы обучения по номеру шифра). Поскольку значений параметров в представленных ниже таблицах меньше, чем число вариантов – выбор осуществляется с циклическим повторением.

В качестве исходных характеристик для расчетов используем следующие параметры:

Таблица 1. Ширина полосы частот канала

Вариант N	1	2	3	4	5	6
$\Delta F_{кан}$, МГц	15	10	18	14	20	16

Таблица 2.Требуемая скорость передачи $\tilde{B}$, Гбит/с

Вариант N	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tilde{B}$, Гбит/с	1	0.7	0.4	0.9	1.2	0.7	1.1	0.5

Таблица 3. Максимальная величина задержки сигнала вследствие многолучевого распространения

Вариант N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta\tau$, нс	200	210	180	190	205	220	170	208	196

Введем защитный временной интервал (guard interval или Cyclic Prefix) для устранения межсимвольных искажений, вызываемых эффектами

многолучевого распространения радиоволн $\Delta g = 8\Delta\tau$. Guard interval показан на рисунке 4.

Далее необходимо произвести расчет длительности OFDM символа

$$T_{symbol} = 32\Delta g \tag{2}$$

и длительность символа без учета защитного временного интервала (синий прямоугольник на рисунке 4)

$$T = T_{symbol} - \Delta g \tag{3}$$

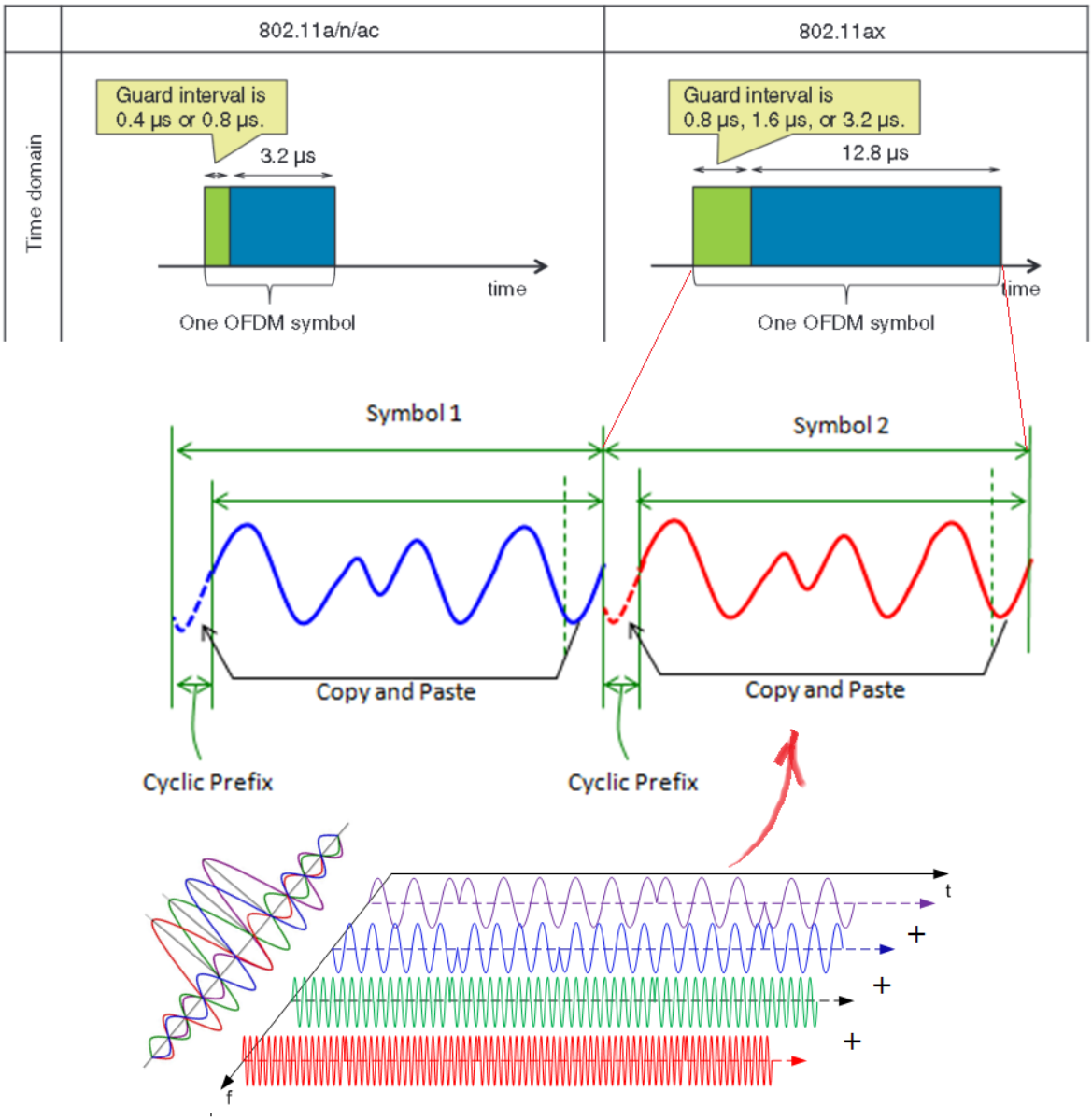


Рисунок 4.

Благодаря прямоугольному формированию радиоимпульса спектры символов OFDM являются функциями sinc, которые равноудалены на оси частот на Δf_{car}. Например, для сигнала k-й поднесущей, спектр описывается в уравнении $S_k(f) = \mathrm{sinc}\left[\pi T(f - k\cdot\Delta f)\right]$. Типичный спектр OFDM, показанный на рисунках 5 и 6, состоящий из множества смежных sinc функций, которые сдвинуты на Δf по оси частот.

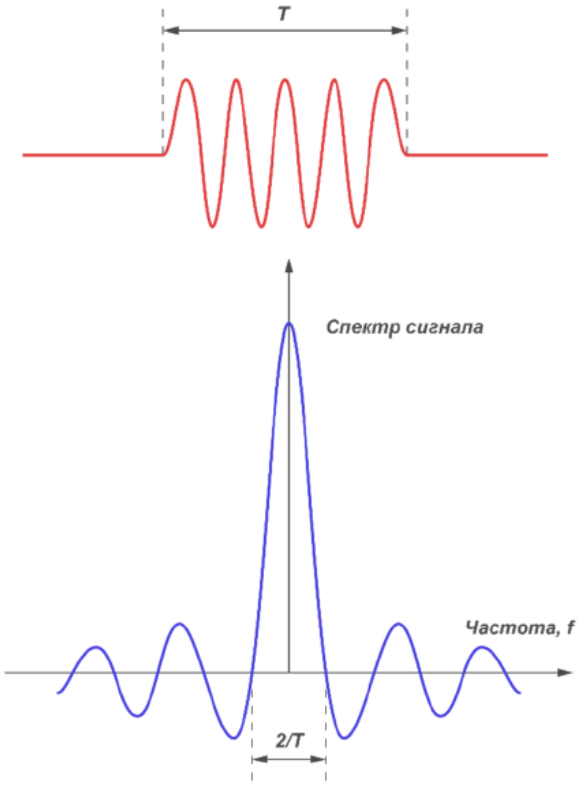


Рисунок 5 – Радиоимпульс длительностью T и его спектр $S_k(f) = \mathrm{sinc}\left[\pi T(f - k \cdot \Delta f)\right]$

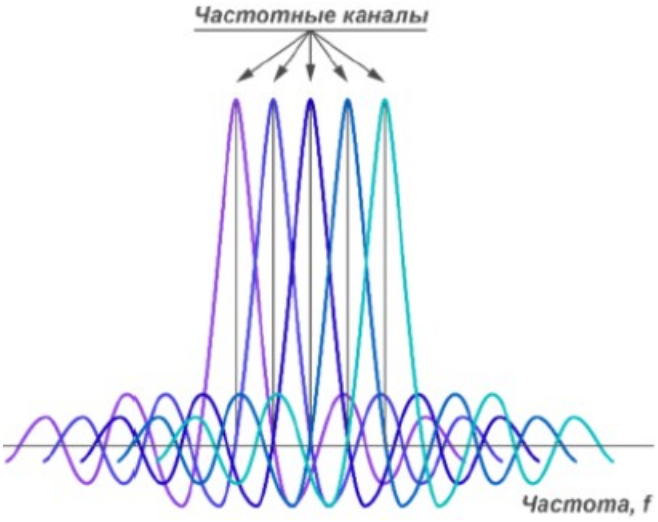


Рисунок 6 – Частотное разделение каналов с ортогональными поднесущими

Как видно из рисунков 5,6 при длительности радиоимпульса T расстояние между частотами соседних поднесущих можно найти по формуле

$$\Delta f_{car} = \frac{1}{T} \tag{4}$$

Полоса частот, которую будет занимать OFDM сигнал, можно определить выражением

$$\Delta f_{OFDM} = N_{k\,OFDM} \cdot \Delta f_{car} \tag{5}$$

следовательно полоса канала должна быть не меньше значения $\Delta f_{OFDM} \le \Delta F_{кан}$. Принимая ширину спектра сигнала OFDM равной ширине канала $\Delta f_{OFDM} = \Delta F_{кан}$, можно найти максимально допустимое количество поднесущих в полосе частот системы

$$N_{k\,OFDM} = \frac{\Delta F_{кан}}{\Delta f_{car}} \tag{6}$$

Необходимо учесть также наличие вспомогательных поднесущих: пилотных и защитного интервала (см. рисунок 5).

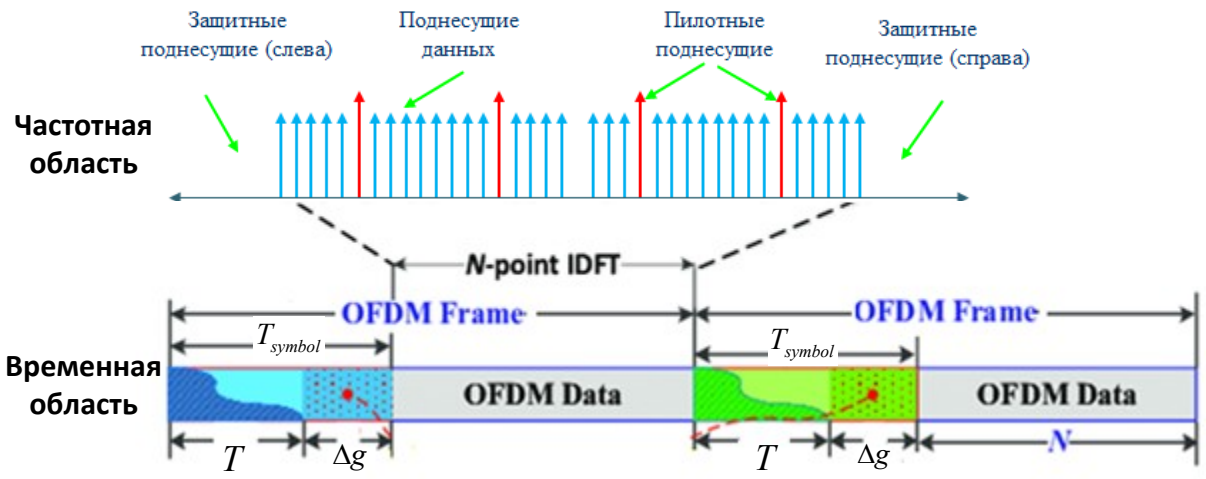


Рисунок 5 – Информационные и пилотные поднесущие в символе OFDM

В соответствии со следующими формулами рассчитаем максимальные интервалы между пилотными поднесущими в частотной и временной плоскостях:

$$D_{freq} < \frac{1}{\Delta\tau\,\Delta f_{car}} \qquad (7)$$

$$D_{time} < \frac{1}{2T_{symbol}\,F_{Doppl}}$$

где F_{Doppl} – частота Допплеровского сдвига (принимаем равной 100 Гц).

Примем D_{time} = 1, то есть в каждом передаваемом OFDM-символе будут содержаться пилотные поднесущие, количество которых обозначим через N_p. В рамках каждого OFDM-символа расположим пилотные поднесущие на расстоянии D_{frerq} /10 друг от друга, тогда зная общее число поднесущих $N_{k\,OFDM}$ (все стрелки ↑ на рис. 5) можно посчитать количество пилотных поднесущих N_p в одном OFDM-символе (красные стрелки ↑ на рис. 5).

Число поднесущих $N_{k\,OFDM}$ должно быть кратно $N_{FFT}=2^m$, так как при обработке сигнала используется алгоритм БПФ (FFT). Для выполнения этого требования можно дополнить передаваемый OFDM-символ нулевыми отсчетами (см. рисунок 6).

Например, если при расчете по формуле (6) число информационных и пилотных поднесущих получилось равным 500, тогда необходимо дополнить передаваемый OFDM-символ 12 нулевыми отсчетами до 512 поднесущих. Тогда на интервал T будет 512 выборок, отсюда интервал дискретизации можно найти как $T_d = T / N_{FFT} = T / 512$.

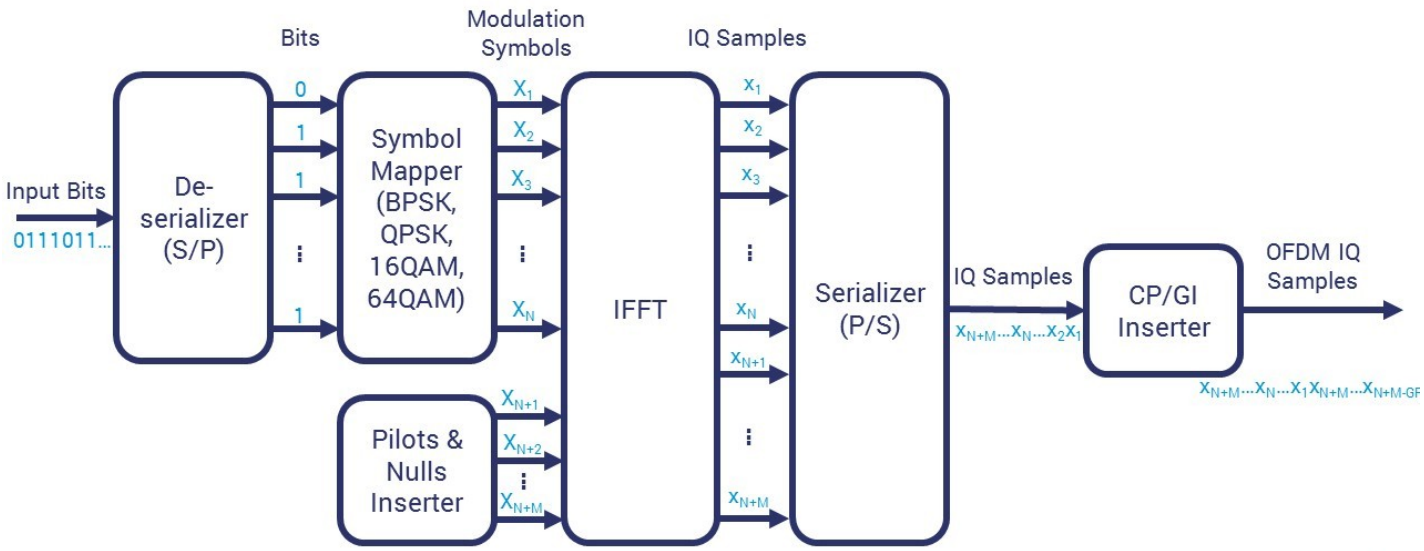


Рисунок 6 – OFDM передатчик

Возможно на интервале времени, равном длительности OFDM-символа, будет укладываться нецелое число интервалов дискретизации $T_{symbol}/T_d \neq$ целому числу. **Изменим интервал дискретизации** T_d так, чтобы на интервале длительностью T_{symbol} укладывалось целое число интервалов дискретизации, т.е. T_{symbol}/T_d стало целым числом.

В результате изменения T_d незначительно изменятся интервал T, защитный интервал Δg и интервал между частотами соседних поднесущих

$$T = T_d \cdot N_{FFT}$$
$$\Delta g = T_{symbol} - T$$
$$\Delta f_{car} = \frac{1}{T}$$

Интервал времени T плюс защитный интервал Δg представляют собой один OFDM-символ (см. рис.7). Из серии OFDM-символов формируется кадр OFDM (англ. frame) .

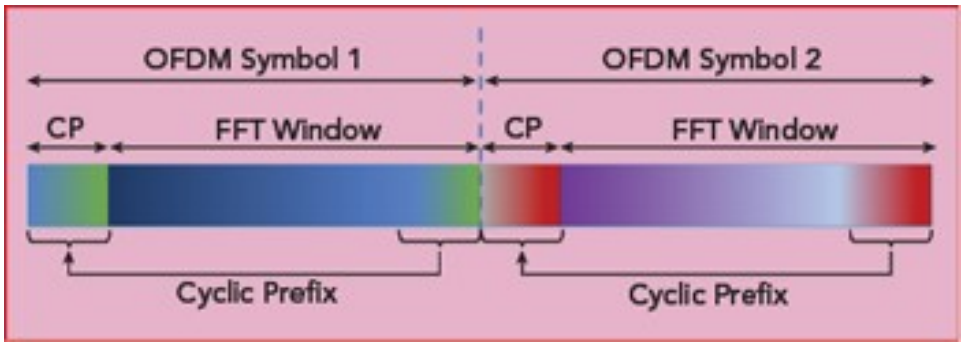


Рисунок 7

Как показано на рисунке 7, длительность кадров LTE составляет 10 мс; эти кадры разделены на 10 подкадров (10 Subframes), причем каждый подкадр имеет длительность 1 мс.

Каждый подкадр содержит два слота длительностью 0,5 мс, которые состоят из 6 или 7 символов OFDM, в зависимости от использования обычного или расширенного циклического префикса.

Спецификации LTE (4G) определяют параметры для полосы пропускания системы от 1,4 МГц до 20 МГц.

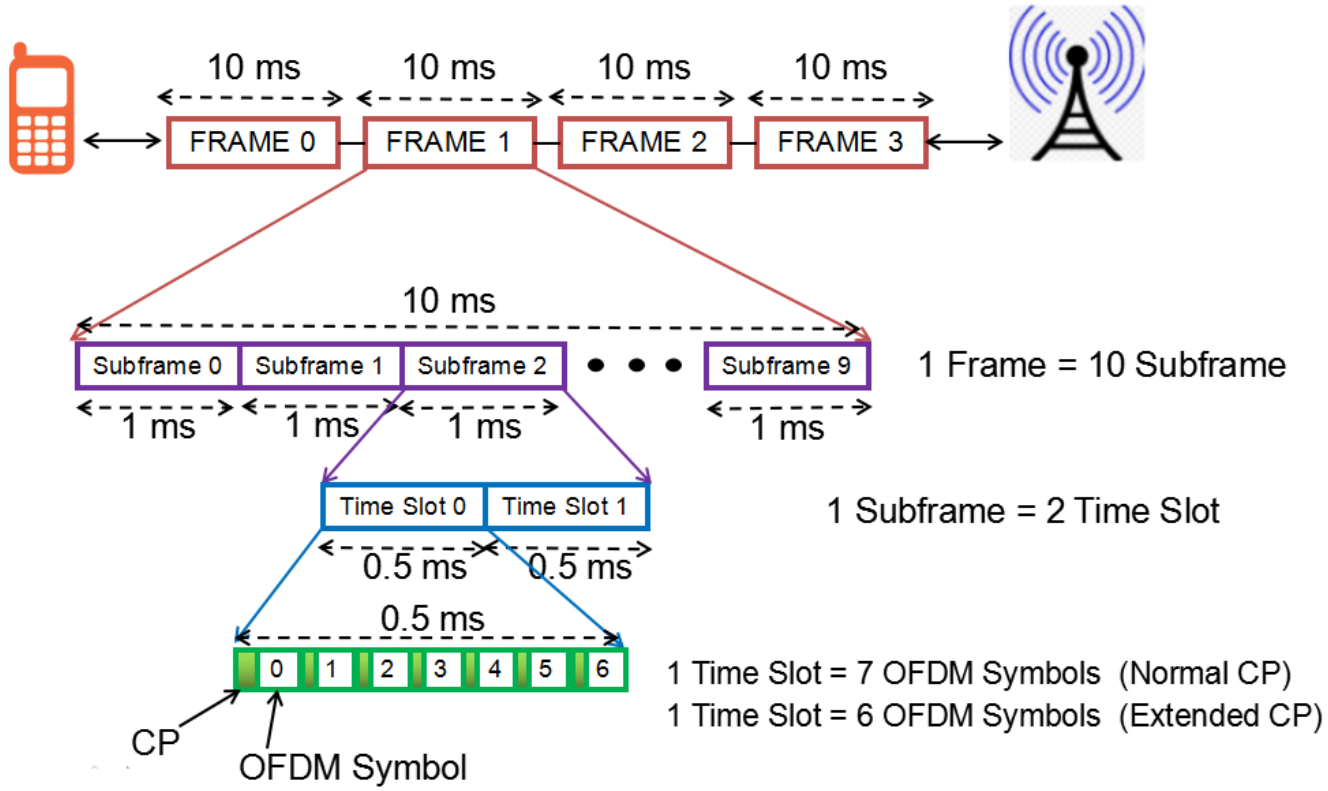
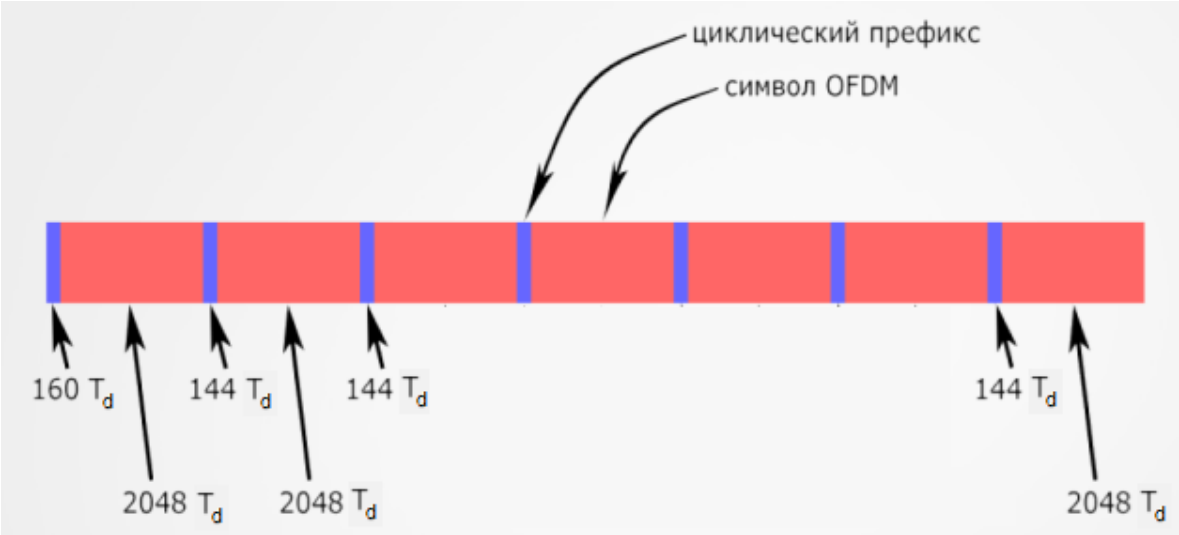


Рисунок. 8 – Кадр (frame) LTE (4G)

В качестве примера на рисунке ниже изображен таймслот из 7 OFDM символов при N_{FFT}=2048



Задание 2. Произвести расчет числа бит в кадре OFDM и расчет пропускной способности системы связи с технологией OFDM при заданном виде модуляции (по варианту). Определить на какой вид модуляции необходимо переключиться, если требуется организовать скорость 2.5 Гбит/с.

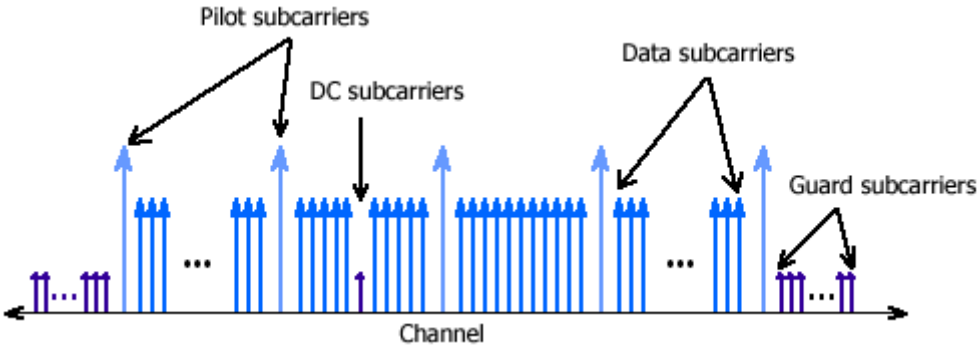


Рисунок. 9 – Виды поднесущих

Каждый кадр OFDM (рис.8) характеризуется параметрами: N_{symbol} – число OFDM-символов; $N_{k\,OFDM}$ – общее число поднесущих (subcarriers); N_p – число пилотных поднесущих (Pilot subcarriers), m – число бит на символ модулированного сигнала (значение брать из практической работы №2, например для 16-QAM m=4).

Число бит, содержащееся в одном кадре OFDM системы связи LTE при выбранном виде модуляции будет определяться по формуле

$$I_{frame} = N_{symbol} \cdot m \cdot (N_{k\,OFDM} - N_p) \text{ бит}$$

Число OFDM-символов N_t определить по рисунку 8 для кадра LTE.

Тогда скорость передачи данных в системе связи LTE при выбранном виде модуляции и при длительности кадра T_{frame}= 10 мс будет определяться как

$$B = \frac{I_{frame}}{T_{frame}} \text{ бит/с}$$

Можно логически вывести формулу для определения требуемого вида модуляции при заданной скорости $\tilde{B}$. Для начала необходимо произвести расчет скорости следования OFDM-символов – какое количество их передается за 1 секунду:

$$R_{symbol} = \frac{1}{T_{symbol}} \text{ симв/с}$$

Далее при заданной скорости передачи $\tilde{B}$ Гбит/с и скорости следования символов R_{symbol} символ/с каждый OFDM-символ должен переносить $\tilde{B}/R_{symbol}$ информационных битов.

Для этого каждая поднесущая должна переносить

$$I_{car} = \frac{\tilde{B}}{R_{symbol} \cdot (N_{k\,OFDM} - N_p)} \text{ бит}$$

Из этого можно определить уровень требуемой модуляции для организации скорости передачи $\tilde{B}$ Гбит/с.

Задание 3. Сравните длительность символа модуляции без применения OFDM и при использовании технологии OFDM. Соотнесите длительность с максимальной величиной задержки сигнала вследствие многолучевого распространения $\Delta\tau$

При заданной скорости передачи $\tilde{B}$ Гбит/с и количестве бит на символ модуляции можно определить требуемое число передаваемых символов за 1 секунду и длительность символа модулированного сигнала (длительность радиоимпульса). Без применения технологии OFDM сигнал будет передаваться радиоимпульсами, необходимо найти их длительность Δt.

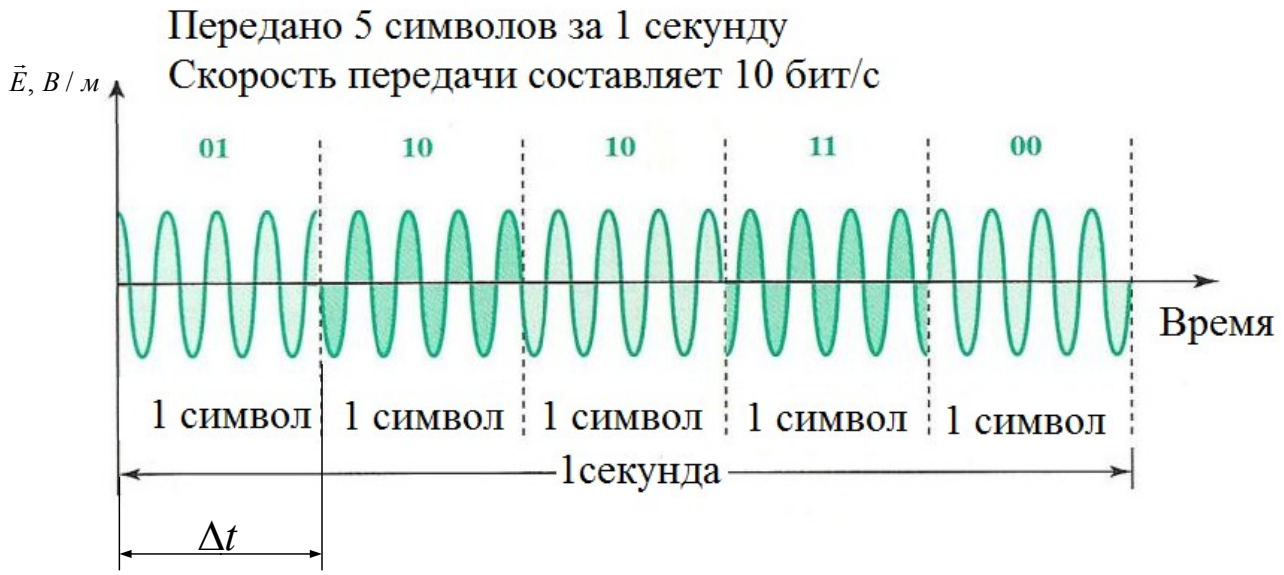


Рисунок. 10 – Сигнал при модуляции QPSK

При технологии OFDM поток данных распараллеливается по $(N_{k\,OFDM} - N_p)$ поднесущим. В результате при использовании того же вида модуляции длительность символов Δt увеличивается в $(N_{k\,OFDM} - N_p)$ раз.

$$\Delta t_{OFDM} = \Delta t \cdot (N_{k\,OFDM} - N_p)$$

Задание 4. В виде вывода сравните полученные значения параметров OFDM с реальными значениями для систем передач с технологиями LTE, Wi-Fi.

Примеры значений в реальных системах:

В системах LTE (4G):

Ширина канала – 20 МГц
Размер FFT – 1024, 2048
Длительность OFDM-символа T_{symbol} = 66.7 мкс
Расстояние между поднесущими Δf_{car} =15 кГц

В Wi-Fi 4:

Ширина канала – 20 МГц, 40 МГц
Размер FFT – 64, 128
Расстояние между поднесущими Δf_{car} = 312.5 кГц
Длительность передачи символа OFDM – 3.6 мс (с коротким интервалом); 4 мс (с длинным интервалом)

В Wi-Fi 5:

Ширина канала – 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц, 80+80 МГц, 160 МГц
Размер FFT – 64, 128, 256, 512
Расстояние между поднесущими Δf_{car} = 312.5 кГц
Длительность передачи символа OFDM – 3.2 мс

В Wi-Fi 6:

Ширина канала – 2.4 ГГц: 20 МГц, 40 МГц; 5 ГГц: 80 МГц, 80+80 МГц, 160 МГц
Размер FFT – 64, 128, 256, 512, 1024, 2048
Расстояние между поднесущими Δf_{car} = 78.125 кГц
Длительность передачи символа OFDM – 12.8 мс

Примечание. В технологии OFDM могут использоваться различные методы модуляции, позволяющие в одном дискретном состоянии сигнала (символе) закодировать несколько информационных битов. Так, в стандарте IEEE 802.11a используются двоичная и квадратурная фазовые модуляции (BPSK и QPSK), в стандарте IEEE 802.11b – дифференциальная двоичная (BDPSK) и квадратурная (QDPSK) относительная фазовая модуляция. Максимальный уровень модуляции:

в стандарте IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) – 64-QAM,
в стандарте IEEE 802.11ac Wave 2 (Wi-Fi 5) – 256-QAM,
в стандарте IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) – 1024-QAM.

Задание 5. Итоговые данные системы связи с технологией OFDM записать в таблицу. По рисункам разобраться с назначением каждого параметра.

Параметр	Значение
Полоса пропускания	
Число точек FFT	
Интервал между поднесущими	
Полезная длительность OFDM символа	
Защитный интервал (циклический префикс)	
Максимальная величина задержки сигнала вследствие многолучевого распространения	
Общее число поднесущих	
Число информационных поднесущих	
Число пилотных поднесущих	
Скорость передачи OFDM символов	
Длительность кадра OFDM	
Число символов OFDM в кадре	
Количество бит в кадре	
Скорость передачи системы связи B	
Вид модуляции для требуемой скорости $\tilde{B}$	

Контрольные вопросы:

1. Зачем была придумана технология OFDM?
2. Где сегодня применяется технология OFDM?
3. Какие параметры характеризуют OFDM символ?
4. Какие виды поднесущих существуют?
5. Зачем нужны пилот-поднесущие?
6. Зачем нужен циклический префикс?
7. Какие сигналы называются ортогональными?
8. Какие еще существуют технологии в связи кроме OFDM?
9. Можно совместно использовать модуляцию OFDM с модуляциями QAM, QPSK и др.?
10. Можно ли применять OFDM в волоконно-оптических системах связи?

Теоретические сведения:

Канальный ресурс LTE (4G). Ресурсный блок и ресурсный элемент

Существующий канальный ресурс состоит из ***ресурсных блоков (РБ)***, каждый из которых включает 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц и одного временного слота (7 или 6 OFDM-

символов на интервале 0,5 мс). Каждый OFDM-символ представляет собой ***ресурсный элемент (РЭ)***, параметрами которого являются 2 значения: {k,l}, где *k* указывает на номер поднесущей, а *l* – номер символа в ресурсном блоке. Во время передачи по линии «вниз» (от базовой станции к абонентской) в каждом блоке из 12×7 = 84 ресурсных элементов, некоторые из которых применяют для отправки опорных (reference) символов. Выделяемый канальный ресурс определяют количеством ресурсных блоков или групп ресурсных блоков.

Следует учитывать, что скорость передачи сокращается, поскольку часть ресурса занимают пилот символы и управляющие каналы. Пилот символы используют для оценки канала.

В LTE используется адаптивная модуляция и кодирование для повышения пропускной способности передачи данных. Схемы модуляции, поддерживаемые для полезной нагрузки в восходящей и нисходящей линиях связи - QPSK, 16QAM и 64QAM.

Таблица 1. 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 под несущих	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)					

Таблица 2. 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

Рекомендация к прочтению:https://wireless-e.ru/standarty/problemy-5g-new-radio/

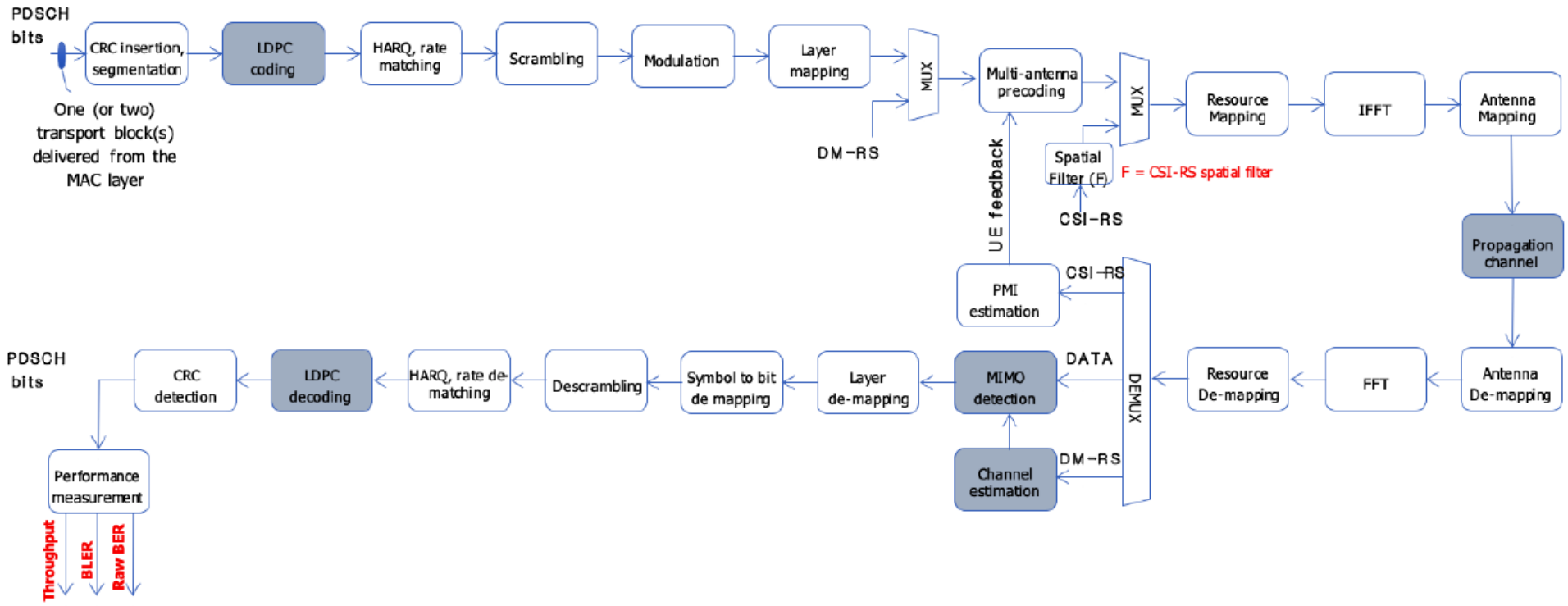


Рисунок 11 – Структурная схема системы связи 5G с технологиями OFDM и MIMO

Ключевые параметры:

• Ширина канала (**Channel Bandwidth**) [МГц или MHz]
• Отношение сигнал/(шум+интерференция) **(SINR)** [дБ или dB]
• Физический идентификатор соты [0,1,2...,1007]

• Число TX антенн и RX антенн (**MIMO configuration**)
• Частота несущей (**Carrier Frequency**) *fc* [ГГц или GHz]
• Период повторения пакета [5 10, 20, 40, 80, 160] [мс или ms]

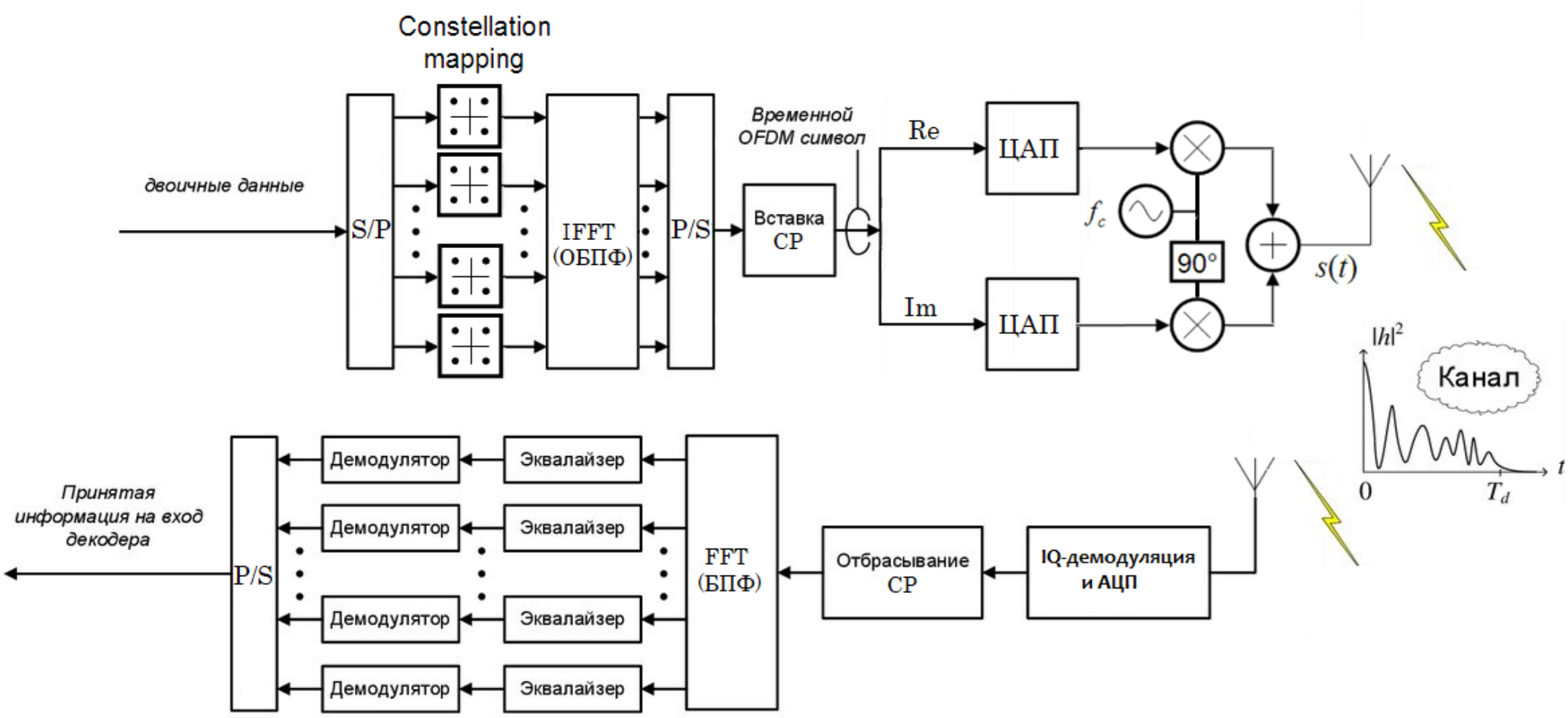
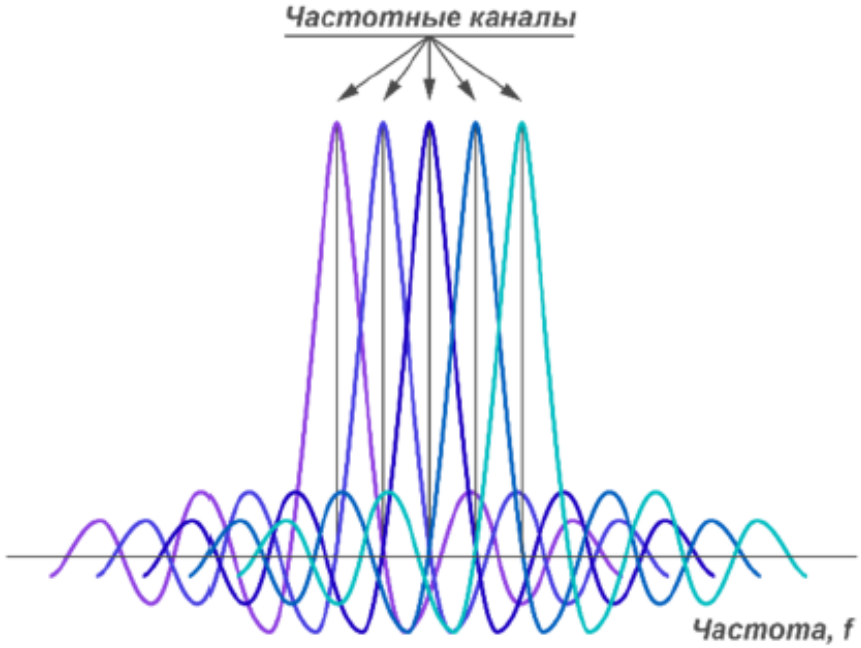


Рисунок 12 – Структурная схема OFDM-системы связи


Частотные каналы
Частота, f