

Цифровые системы передачи информации на основе сигнала с ортогональным частотным разнесением каналов (OFDM)

Лекция 2

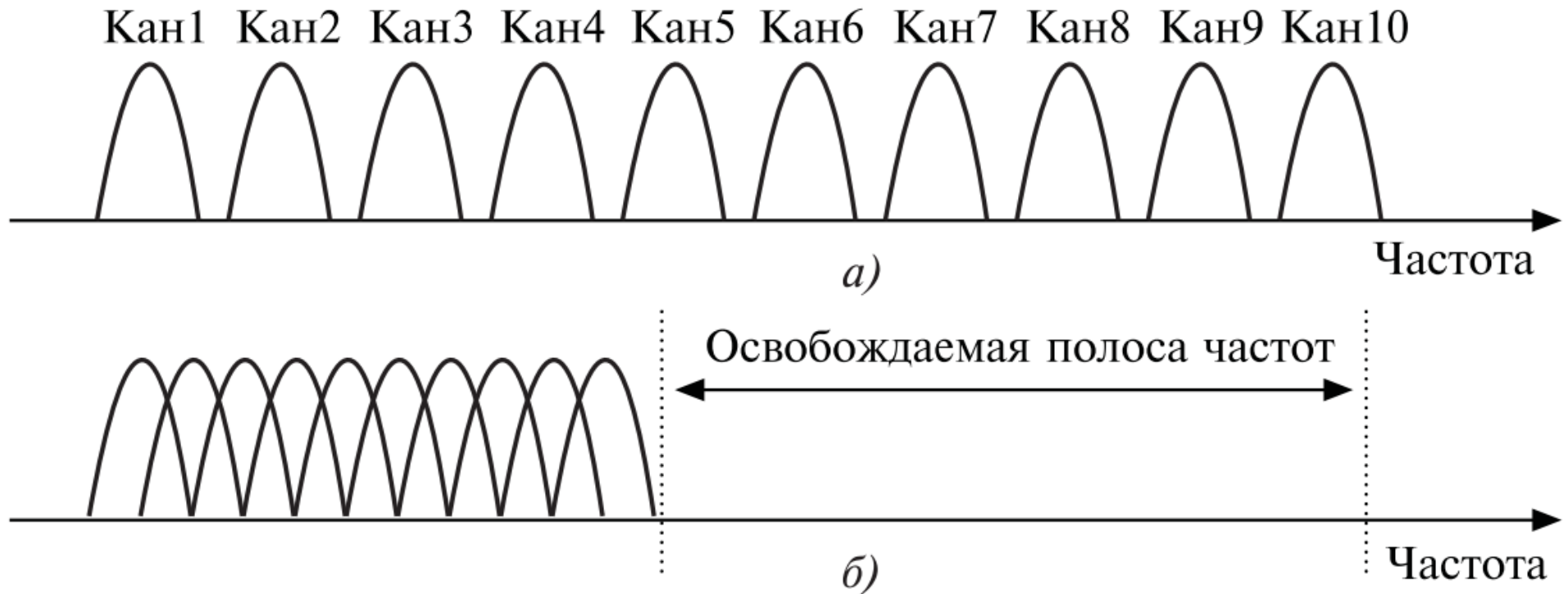
Лектор: Янситов Константин Константинович

План лекции

- Принцип работы
- Ортогональность
- Защитный интервал
- Параметры OFDM сигнала
 - Квазистационарная характеристика канала
 - Расстояние между подканалами
 - Время когерентности каналов

Принцип работы

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением



Принцип работы

Области применения

- ADSL (проводная передача данных);
- Наземное цифровое вещание (в частности, DVB-T2);
- WiFi (высокоскоростной беспроводной доступ в Интернет);
- LTE (подвижная связь 4-го поколения).

Принцип работы

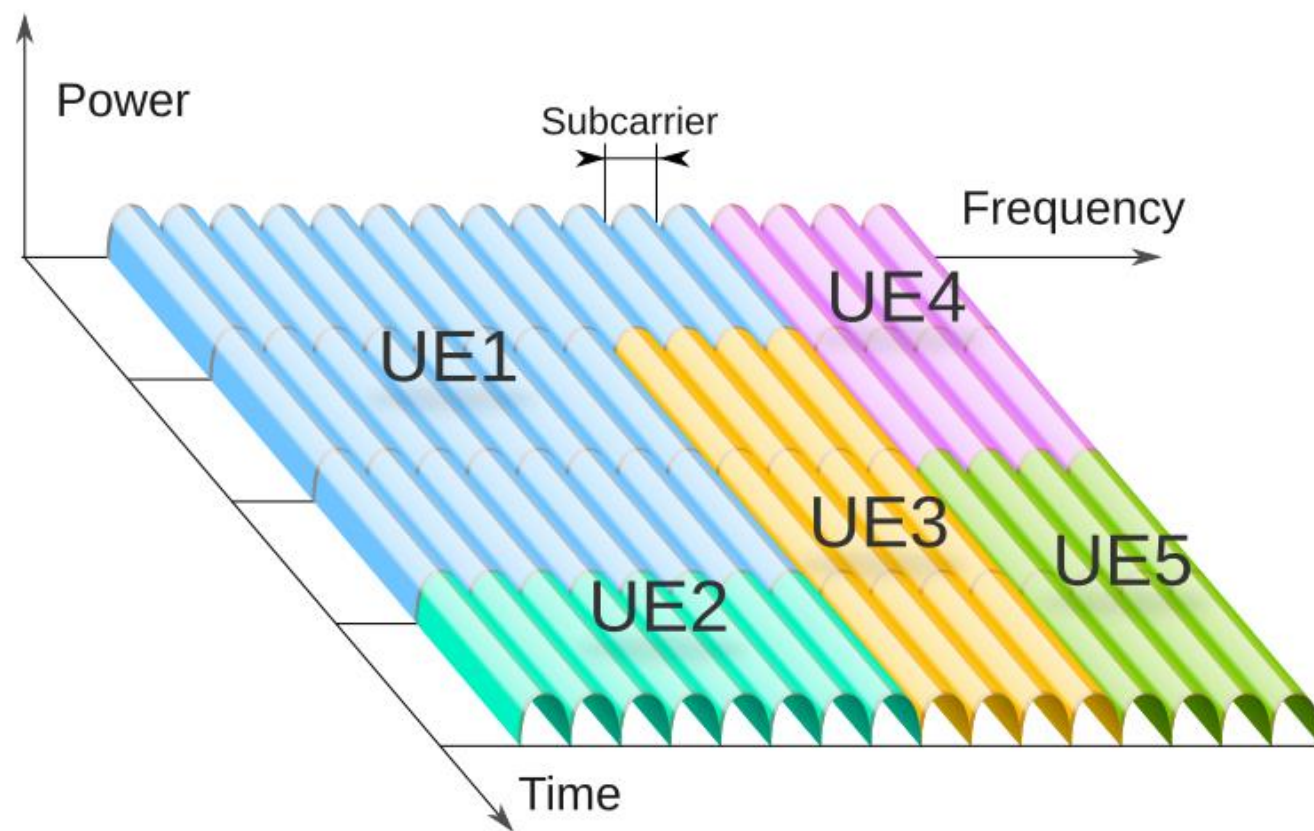
Преимущества

- OFDM обеспечивает высокую спектральную эффективность по сравнению с FDM и TDM алгоритмами;
- OFDM является эффективным способом работы в условиях многолучевого распространения сигнала;
- для заданного рассеяния задержки сложность реализации OFDM значительно ниже, чем для системы с одной несущей и эквалайзером;
- в каналах с относительно медленными изменениями возможно существенное увеличение пропускной способности за счет адаптации скорости передачи данных на каждой поднесущей в соответствии с отношением сигнал/шум для этой конкретной поднесущей;
- OFDM делает возможными одночастотные сети, что особенно привлекательно в системах телевизионного вещания и радиовещания.

Недостатки

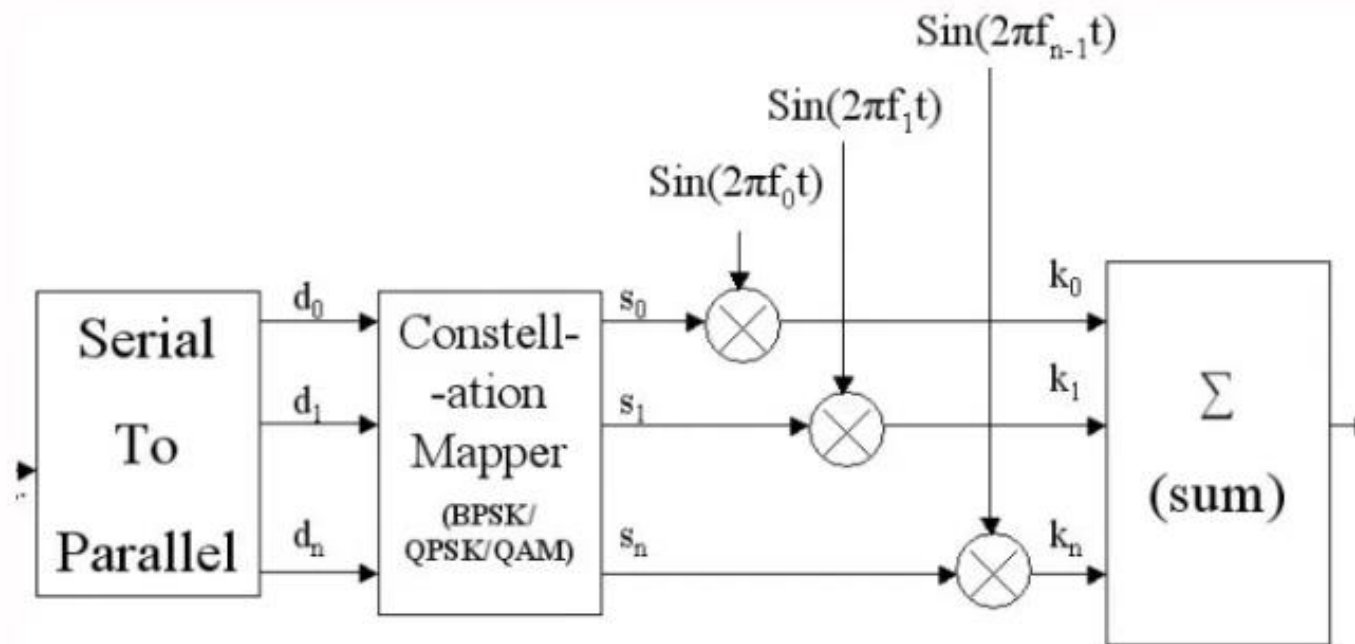
- OFDM более чувствительно к расстройке частоты и фазовому шуму;
- OFDM имеет сравнительно большое отношение пиковой мощности к средней (peak-to-average power ratio — PAPR), что приводит к снижению энергетической эффективности усилителей мощности

Принцип работы



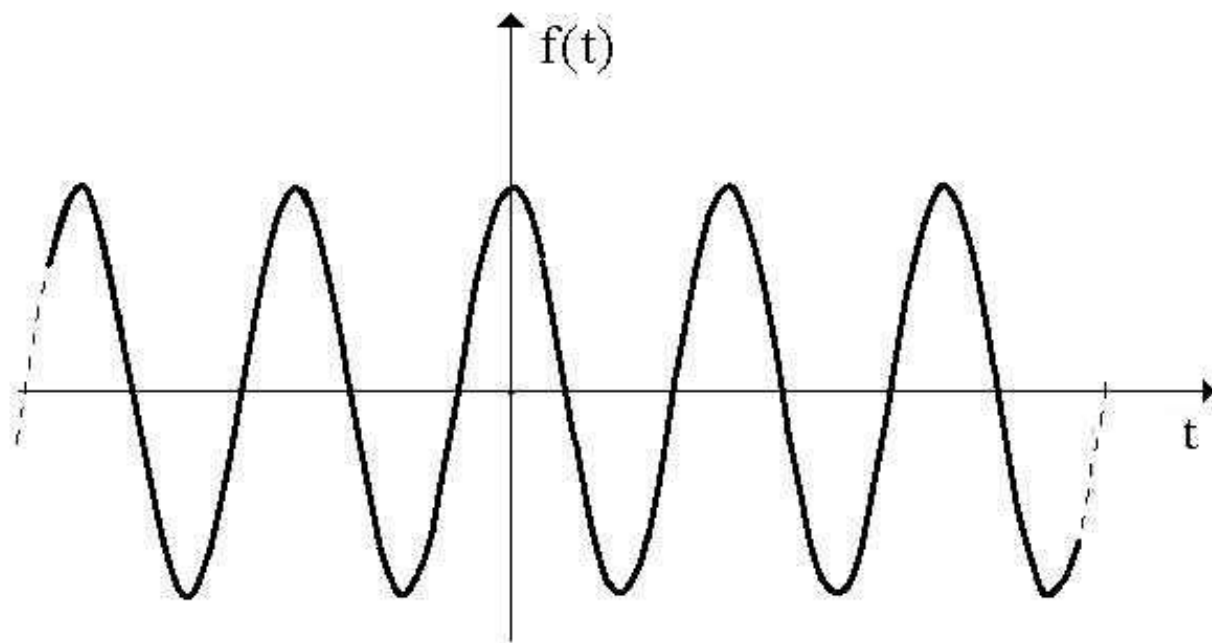
Принцип работы

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением

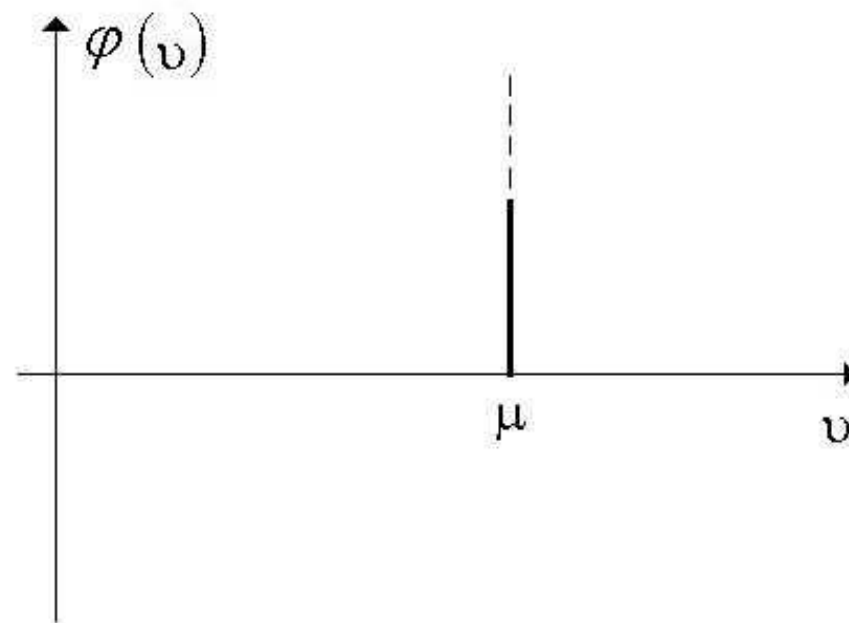


Принцип работы

Синусоида во времени

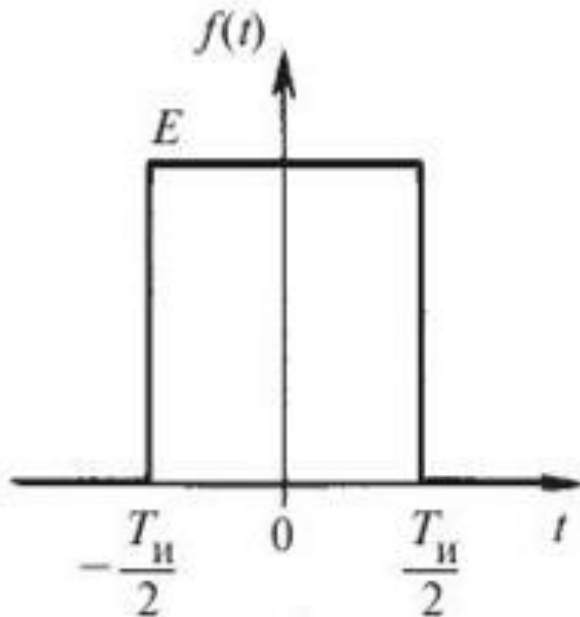


Спектр синусоиды

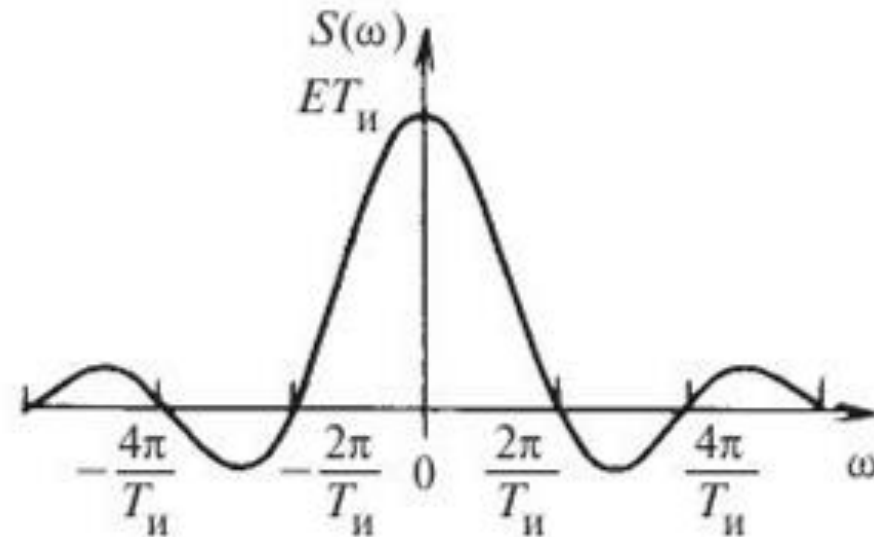


Ортогональное частотное разделение каналов

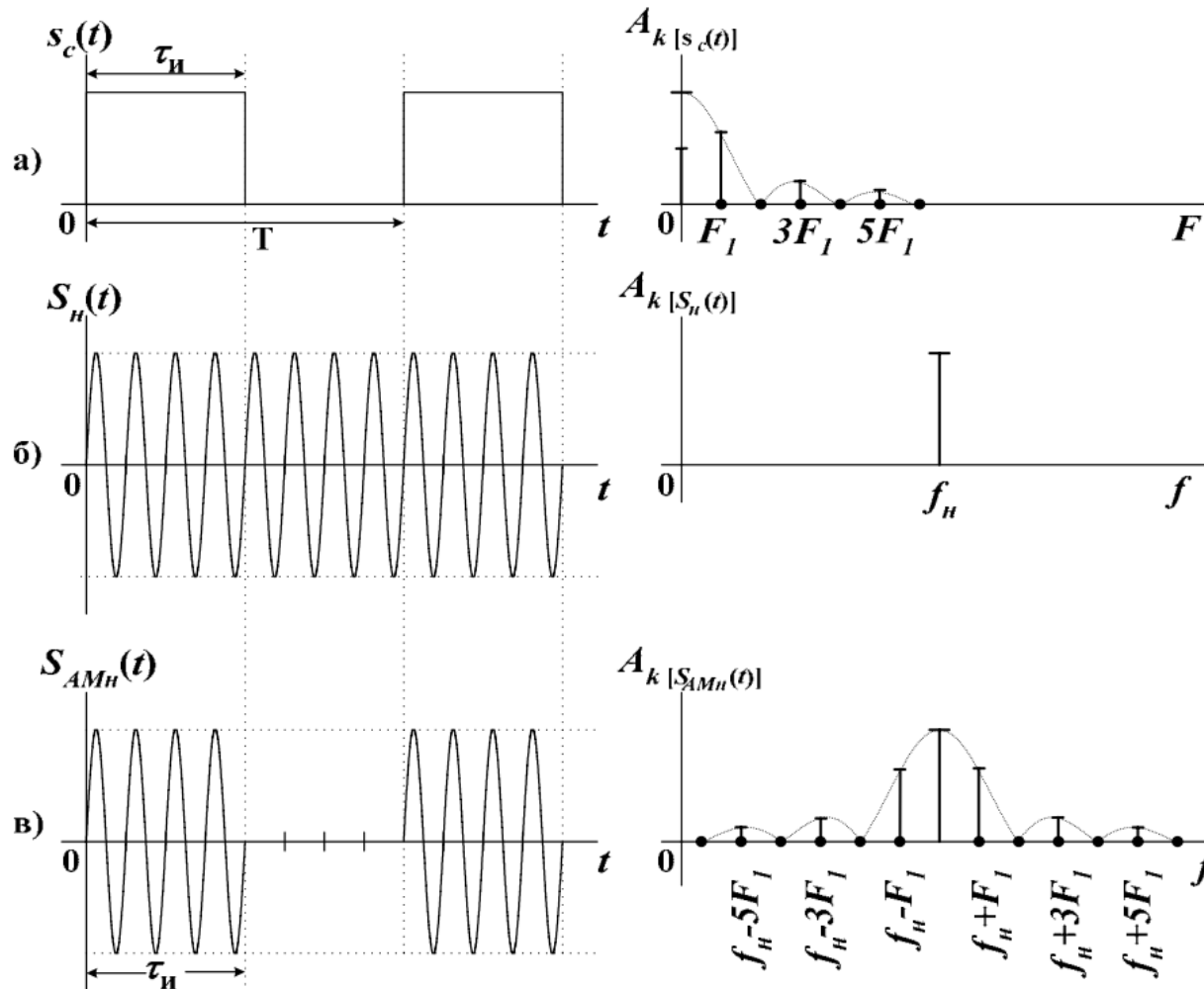
Прямоугольный импульс



Спектр прямоугольного импульса

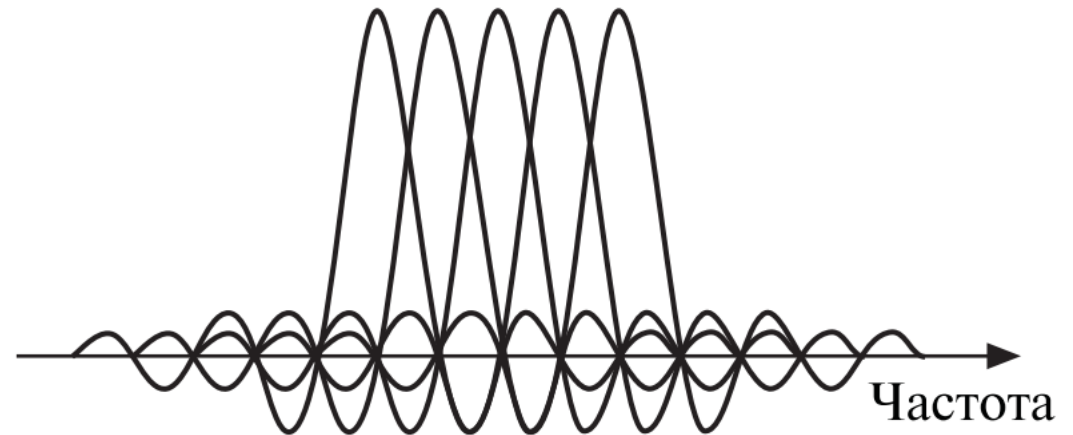
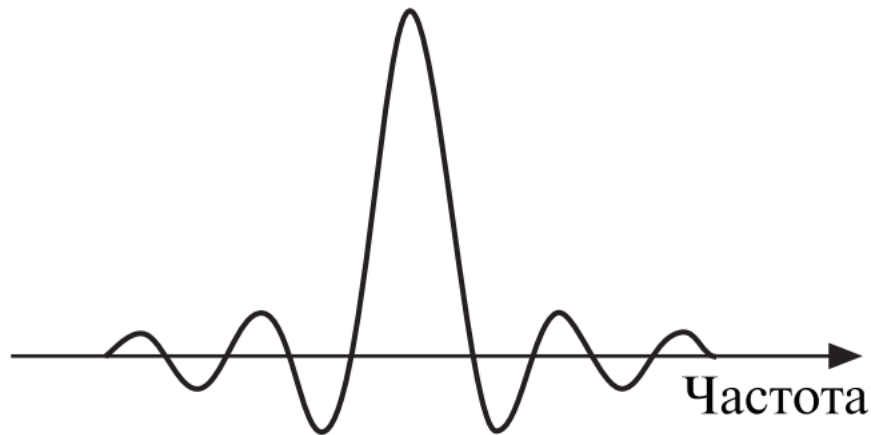


Ортогональное частотное разделение каналов

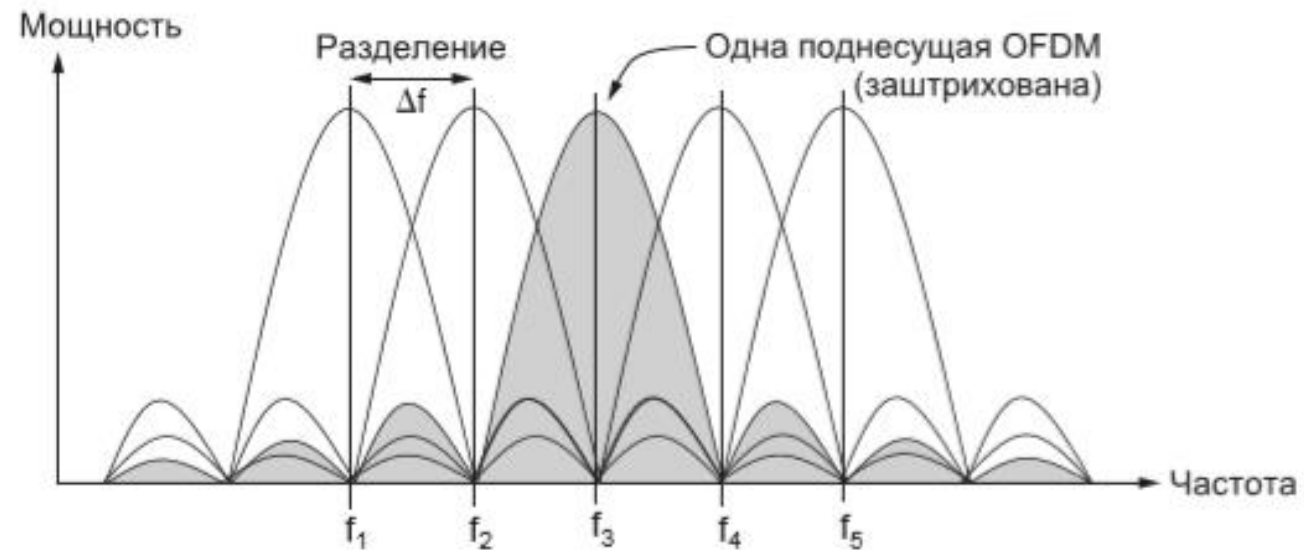


Ортогональное частотное разделение каналов

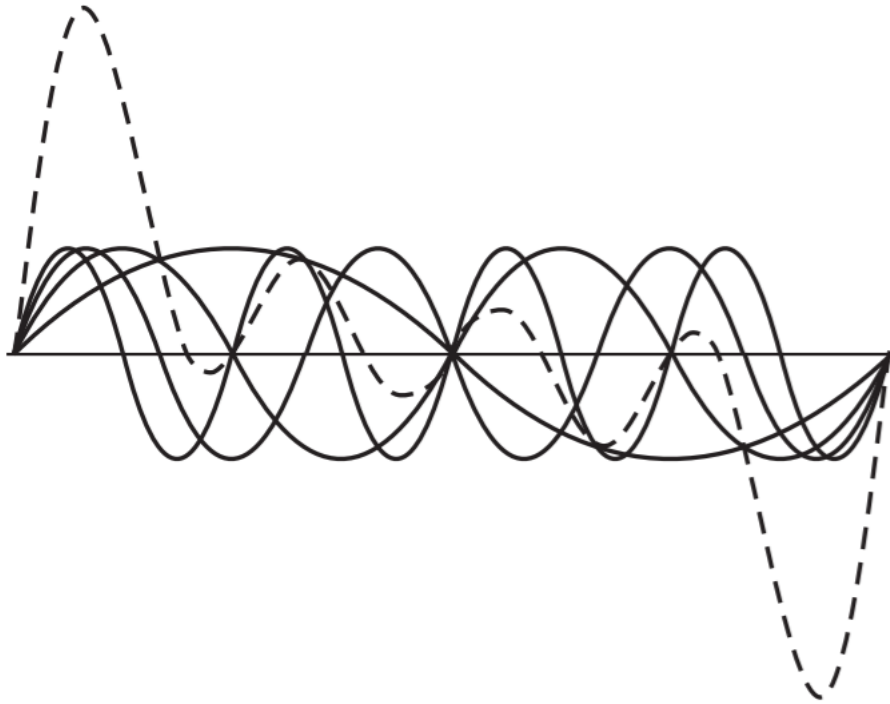
OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением



Ортогональное частотное разделение каналов



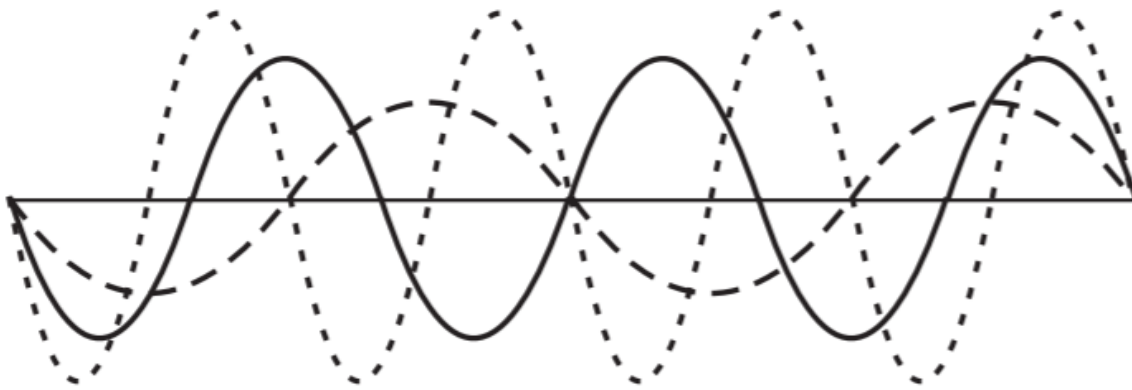
Ортогональное частотное разделение каналов



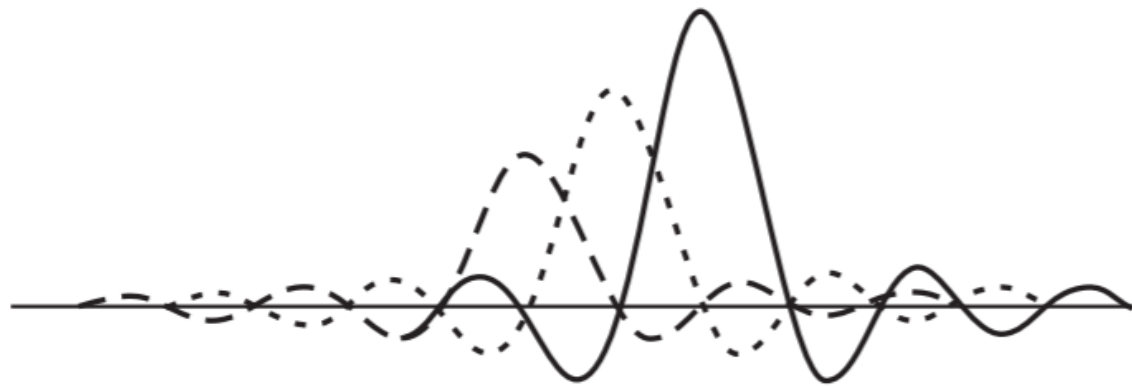
4 поднесущих внутри одного OFDM-символа и их сумма

На протяжении одного OFDM символа укладывается целое количество периодов гармоник

Ортогональное частотное разделение каналов

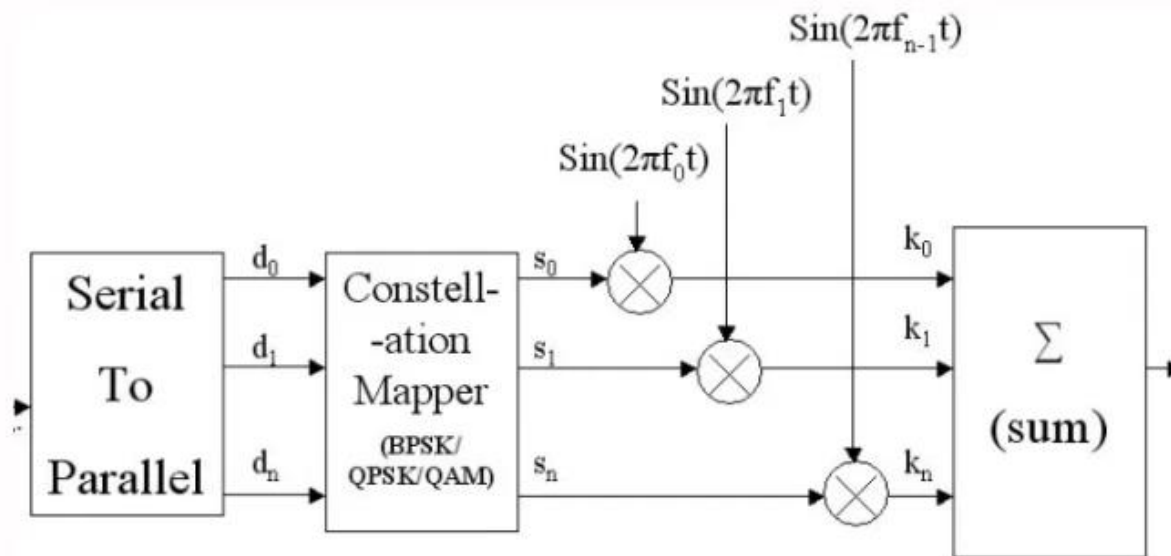


3 поднесущих внутри одного OFDM-символа во временной области с различной модуляцией во временной



3 поднесущих в частотной области OFDM символа с различной модуляцией

Ортогональное частотное разделение каналов



$$s_t = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi k n}{T_{usful}}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k n}{T_{usful}}\right) \right) =$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{j\left(\frac{2\pi k}{T_{usful}}\right)t}$$

$$s_k = a_k + j b_k$$

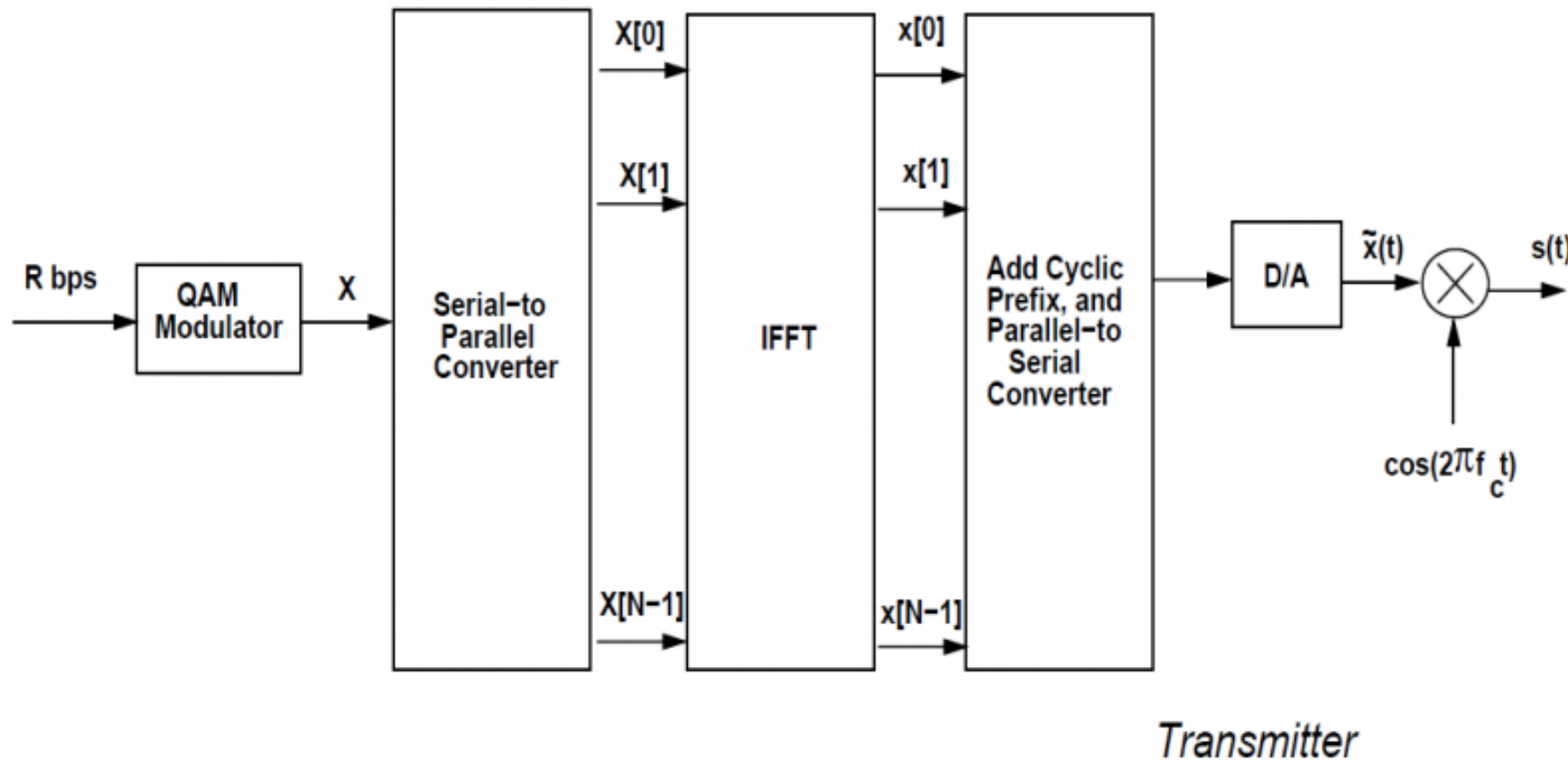
a_k - синфазная составляющая QAM-модулятора

b_k - квадратурная составляющая QAM-модулятора

T_{usful} — период символа

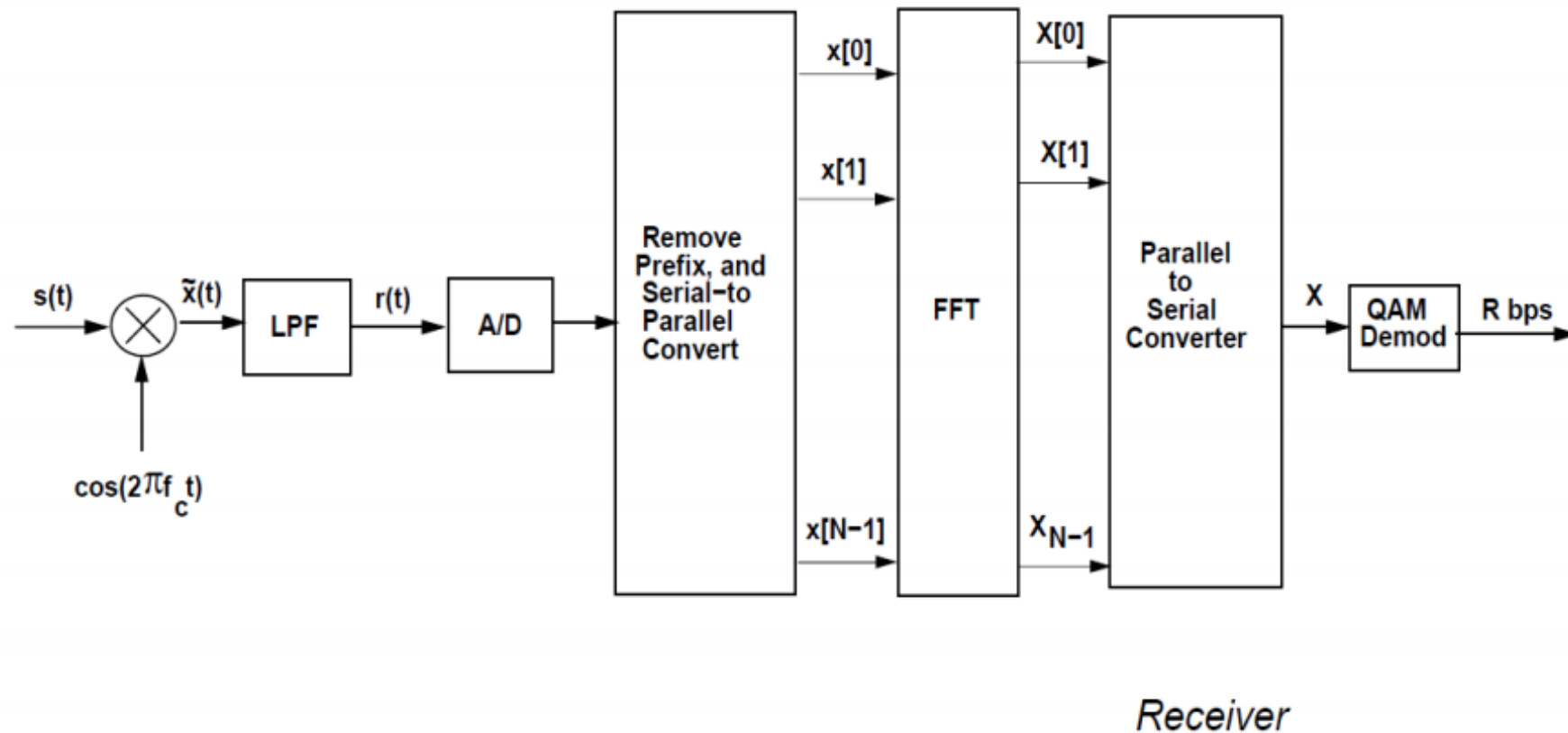
$\frac{1}{T_{usful}}$ — частотный шаг от одной гармоники до другой

Ортогональное частотное разделение каналов



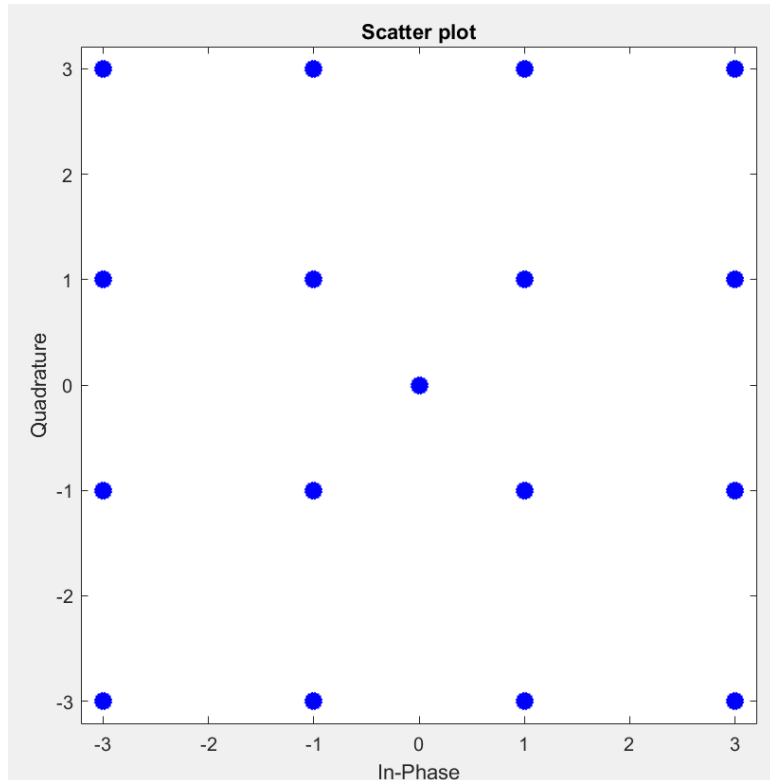
$$s_t = \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{j\left(\frac{2\pi k}{T_{usful}}\right)t}$$

Ортогональное частотное разделение каналов

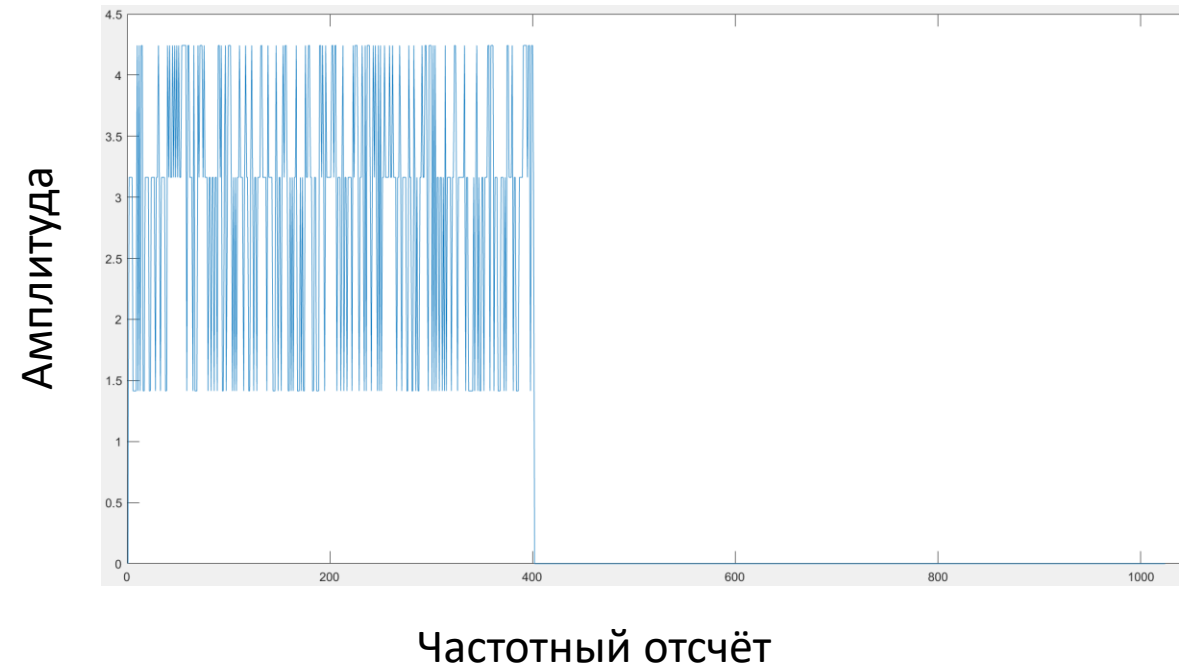


Ортогональное частотное разделение каналов

Амплитудно-фазовая характеристика спектра OFDM-символа



Амплитудно-частотная характеристика ~~спектра~~ OFDM-символа



OFDM

Ортогональность

Полученный сигнал

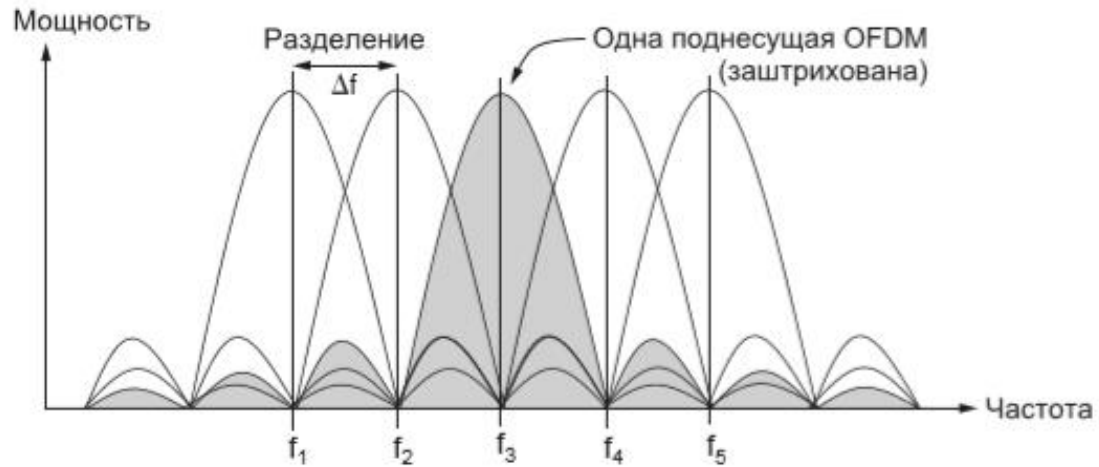
$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=0}^{N_{carrier}-1} (a(n) \cos(2\pi f_n t) + b(n) \sin(2\pi f_n t)) = \\ &= \frac{1}{N_{carrier}} \sum_{n=0}^{N_{carrier}-1} A_n(t) e^{j(2\pi f_n t + \phi_n)} \end{aligned}$$

Где

$$f_n = f_0 + n\Delta f \qquad \Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$$

OFDM

Ортогональность



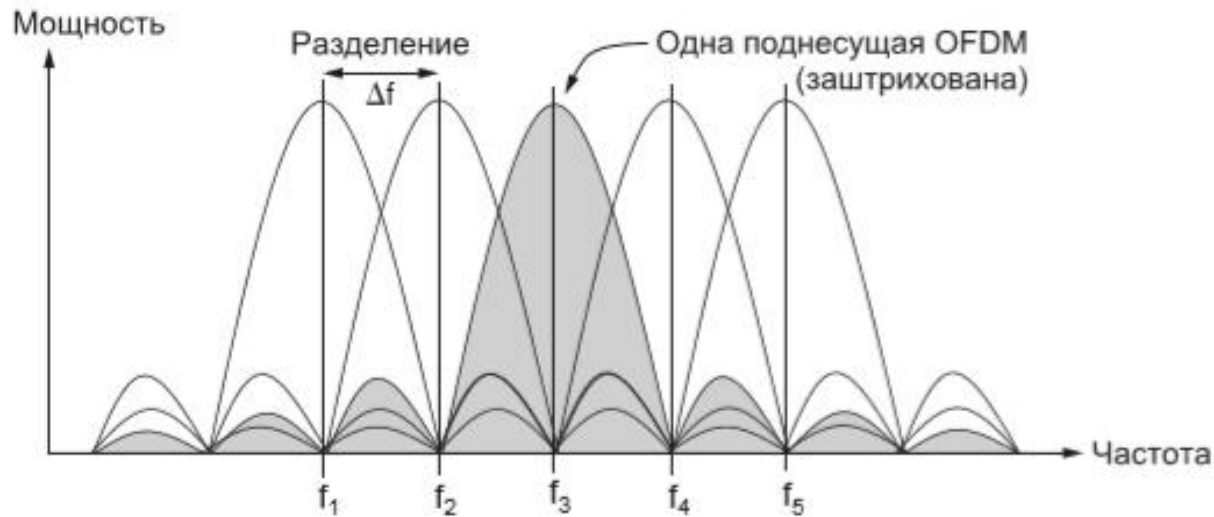
Условие ортогональности сигналов

$$\int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t) = 0$$

$$\Delta f = \frac{1}{T}$$

OFDM

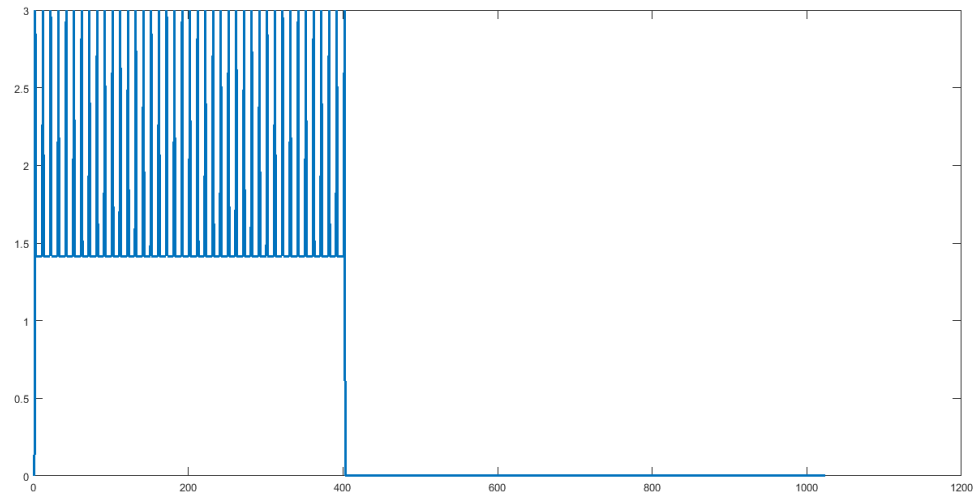
Ортогональность



Условие ортогональности сигналов

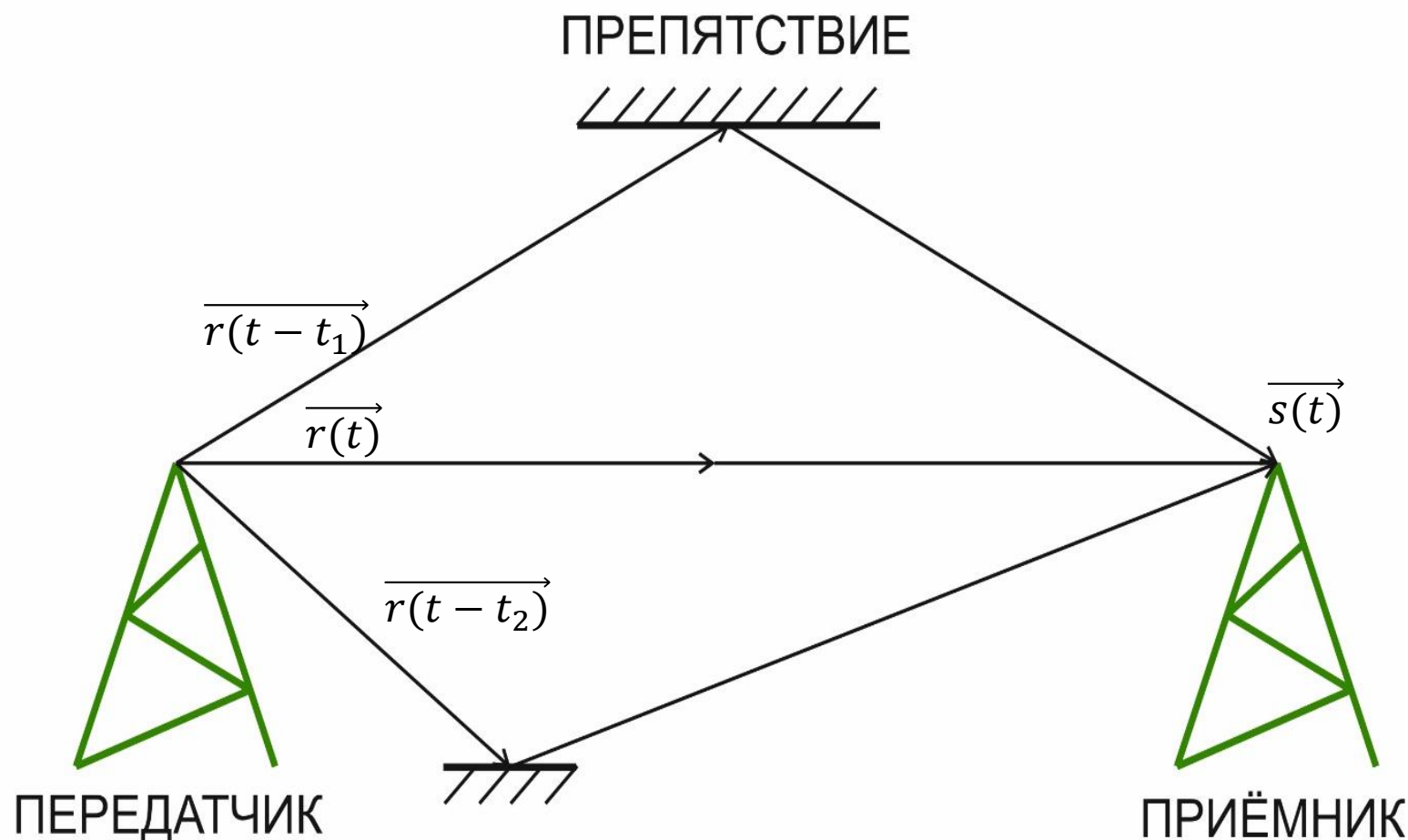
$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{Usful}} \int_{t_0}^{t+T_{Usful}} e^{j\left(\frac{2\pi k}{T_{Usful}}\right)t} e^{-j\left(\frac{2\pi l}{T_{Usful}}\right)t} dt &= \\ = \frac{1}{T_{Usful}} \int_{t_0}^{t+T_{Usful}} e^{j\left(\frac{2\pi(k-l)}{T_{Usful}}\right)t} dt &= \\ = \begin{cases} 0, k \neq l \\ 1, k = l \end{cases} \end{aligned}$$

Ортогональное частотное разделение каналов



Ортогональное частотное разделение каналов

Многолучевое распространение сигнала



$$s(t) = \sum_k r(t - t_k) * h_k(t)$$

$s(t)$ – сигнал на приёмнике

$r(t)$ – сигнал с передатчика

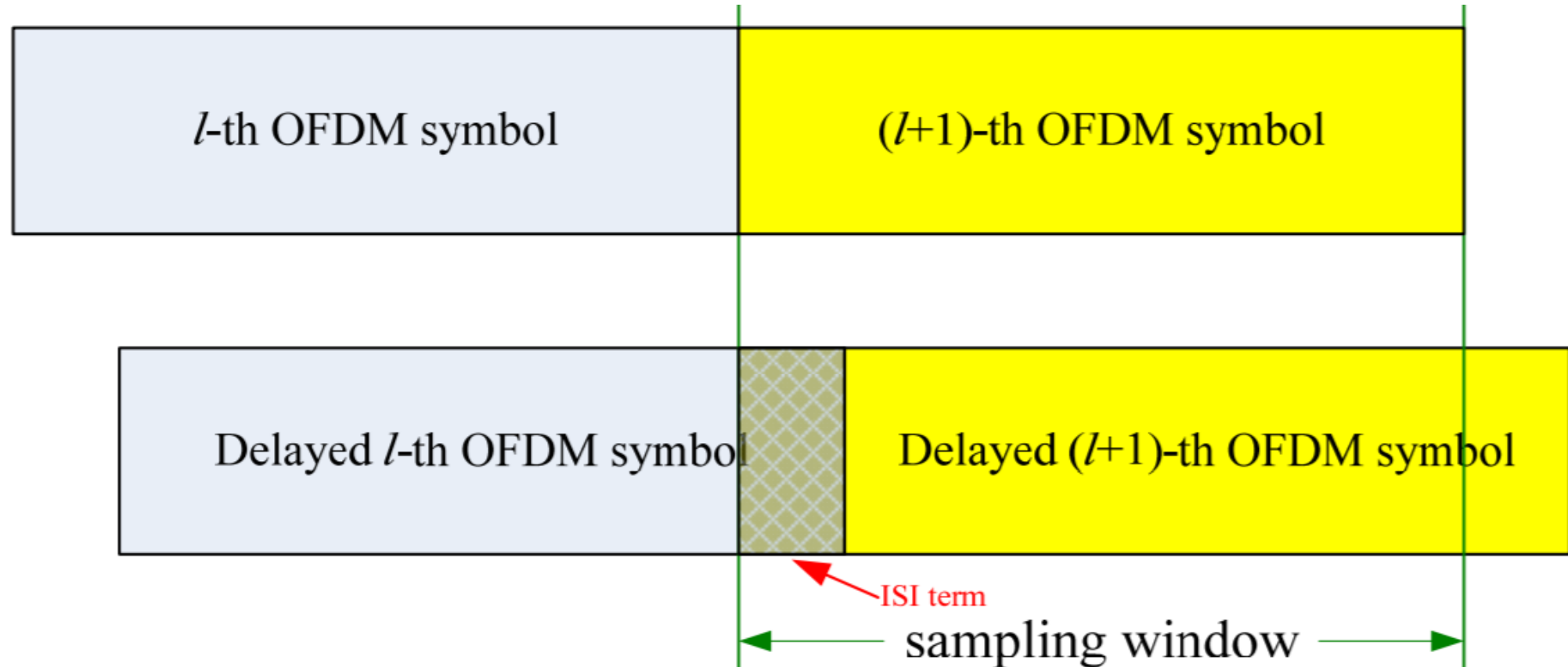
k – номер луча

t_k – временная задержка сигнала для соответствующего луча

$h_k(t)$ – канальная характеристика для каждого луча

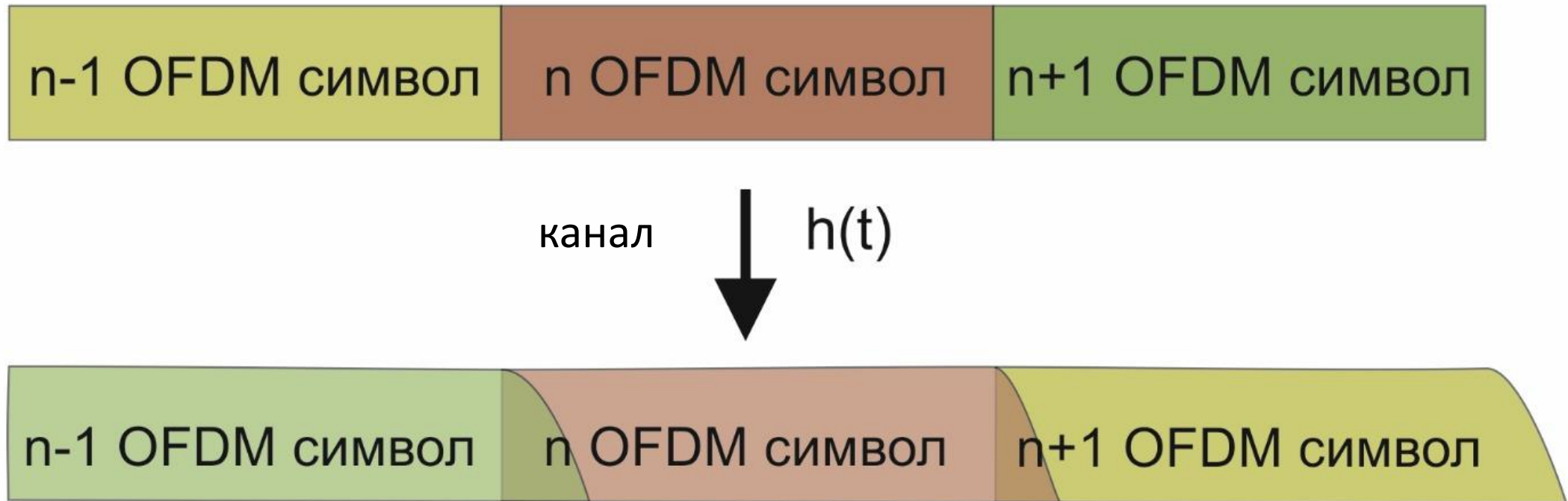
Ортогональное частотное разделение каналов

Многолучевое распространение сигнала



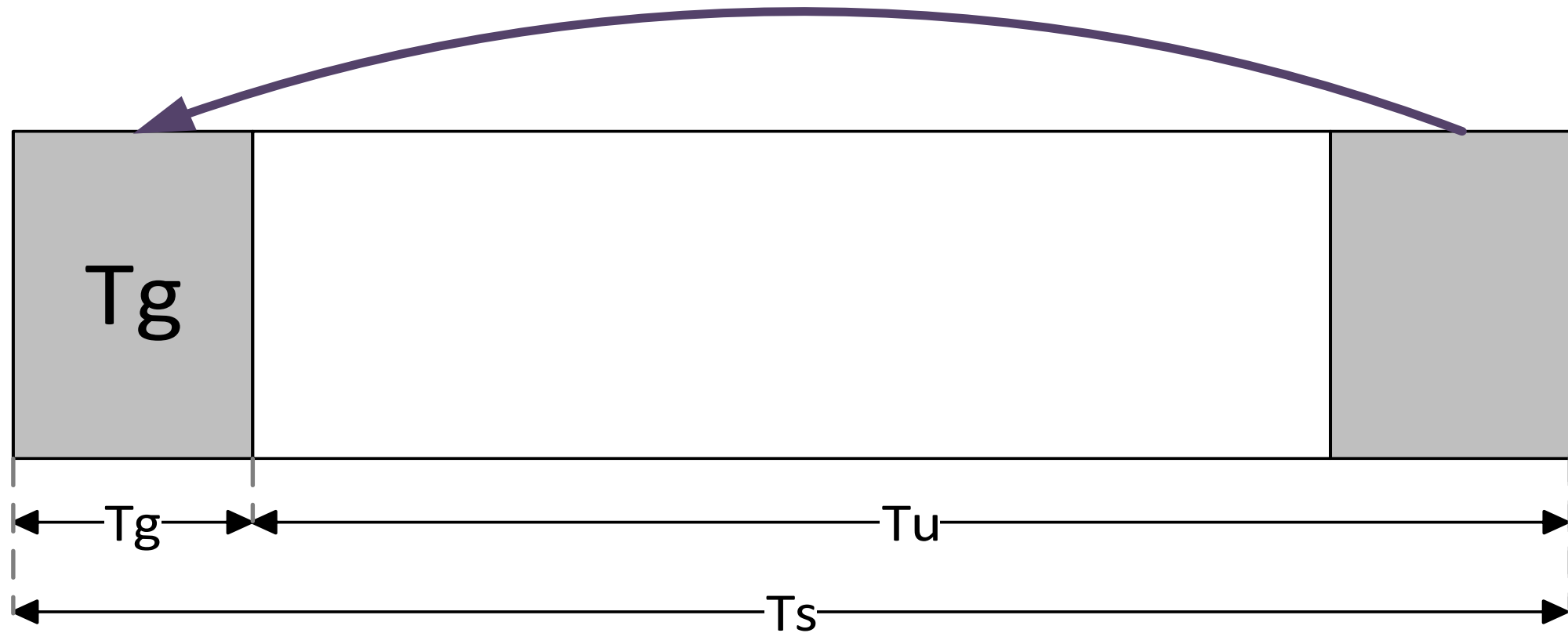
Ортогональное частотное разделение каналов

Многолучевое распространение сигнала



Ортогональное частотное разделение каналов

Защитный интервал



Ортогональное частотное разделение каналов

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА

$$\Delta F = \frac{1}{T_{usful}}$$

$$T_s = T_{usful} + T_{guard}$$

$$\frac{1}{T_s \Delta F} = \frac{T_{usful}}{T_s} = \frac{T_{usful}}{T_{usful} + T_{guard}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{guard}}{T_{usful}}} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

$$\alpha > 0 \longrightarrow \frac{1}{T_s \Delta F} < 1$$

Параметры OFDM сигнала

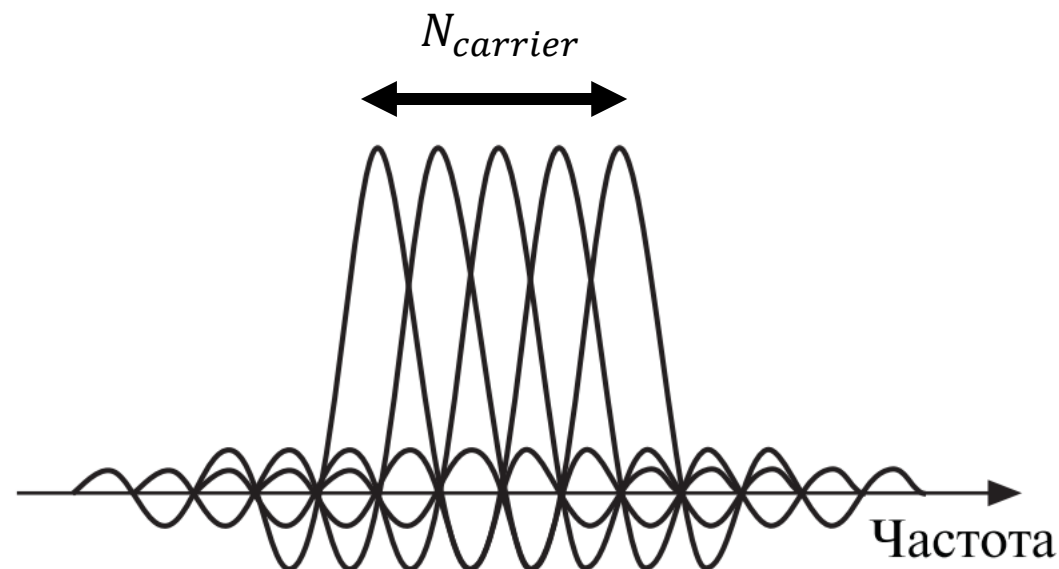
Основные параметры

- Количество несущих на символ
- Количество символов в кадре
- Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
- Защитный интервал
- Тип модуляции информационных несущих
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы

Параметры OFDM сигнала

Полоса сигнала

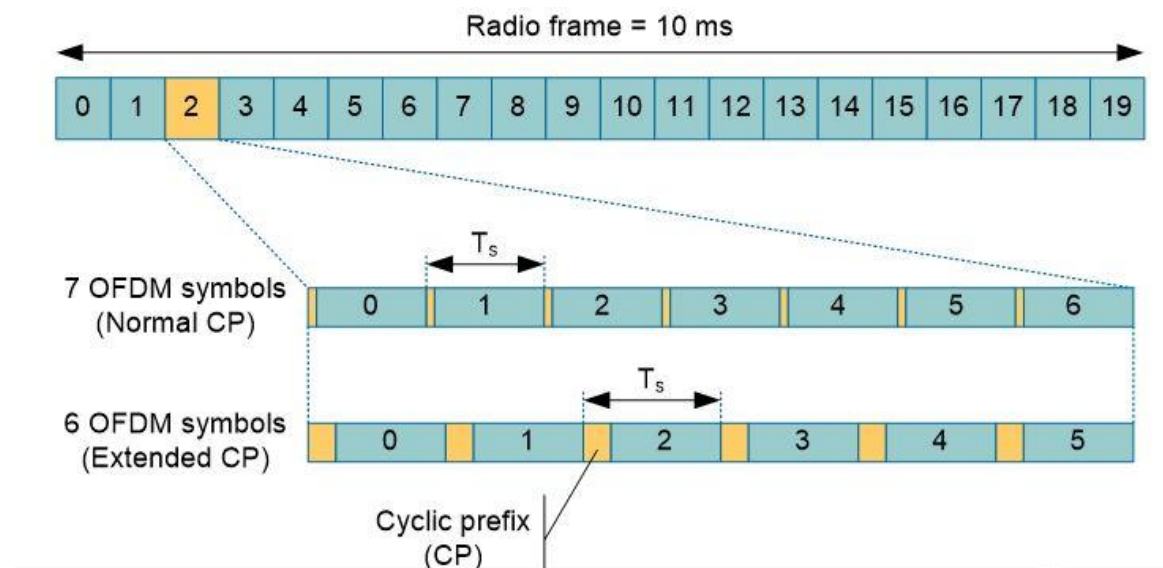
- **Количество несущих на символ**
- Количество символов в кадре
- Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
- Защитный интервал
- Тип модуляции информационных несущих
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы



Параметры OFDM сигнала

Размер кадра

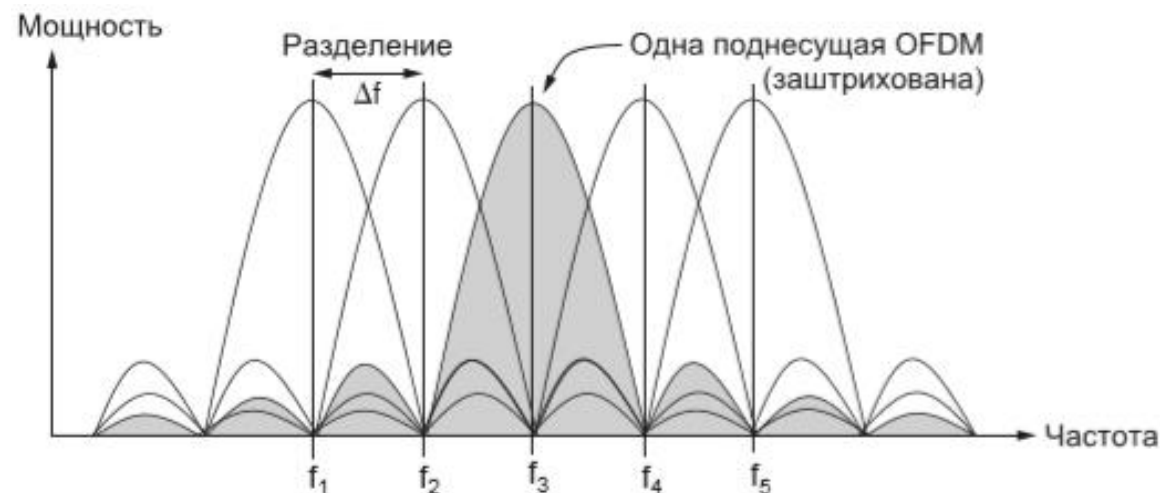
- Количество несущих на символ
- **Количество символов в кадре**
- Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
- Защитный интервал
- Тип модуляции информационных несущих
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы



Параметры OFDM сигнала

Расстояние между подканалами

- Количество несущих на символ
- Количество символов в кадре
- **Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)**
- Защитный интервал
- Тип модуляции информационных несущих
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы



$$N_{fft} = T_{usful} = \frac{1}{\Delta f}$$

$$\Delta f = \frac{1}{T_{usful}} = \frac{1}{N_{fft}}$$

Параметры OFDM сигнала

Расстояние между подканалами

На протяжении длительность OFDM символа, канальная характеристика должна быть либо статичной, либо квазистатичной

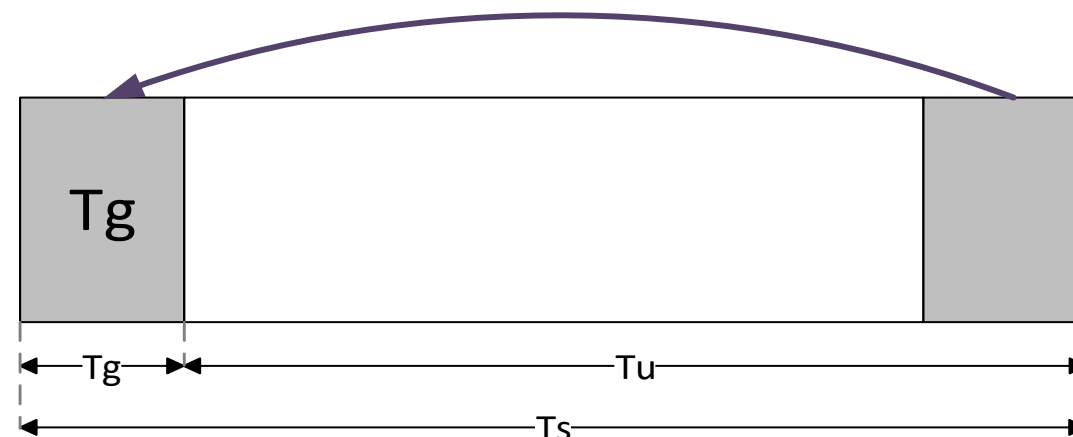
Скорость изменения канальной характеристики должно быть меньше, чем частота следования символов

$$T_{usful} < \tau_{channel}$$

Параметры OFDM сигнала

Защитный интервал

- Количество несущих на символ
- Количество символов в кадре
- Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
- **Защитный интервал**
- Тип модуляции информационных несущих
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы



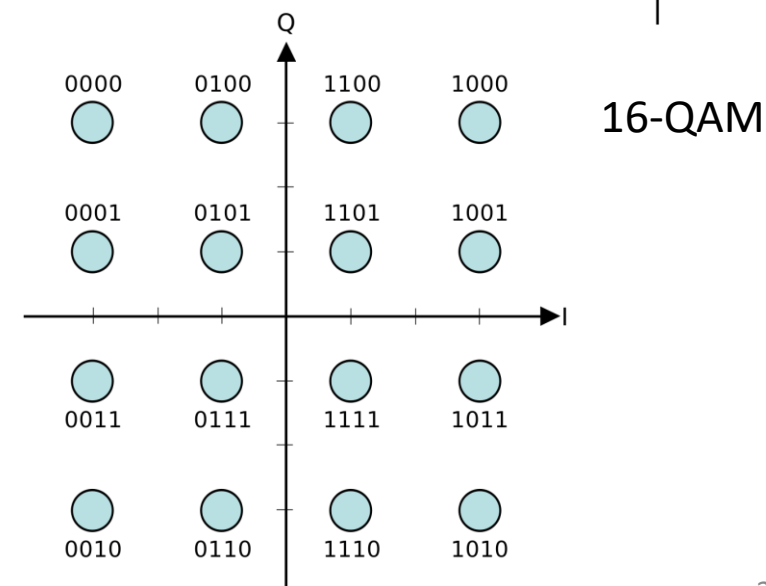
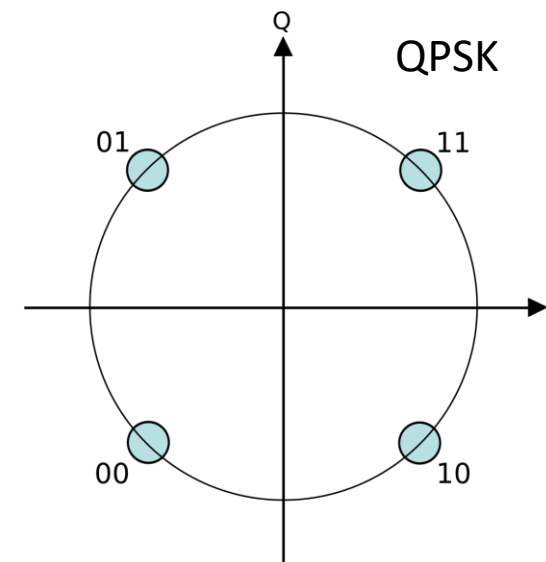
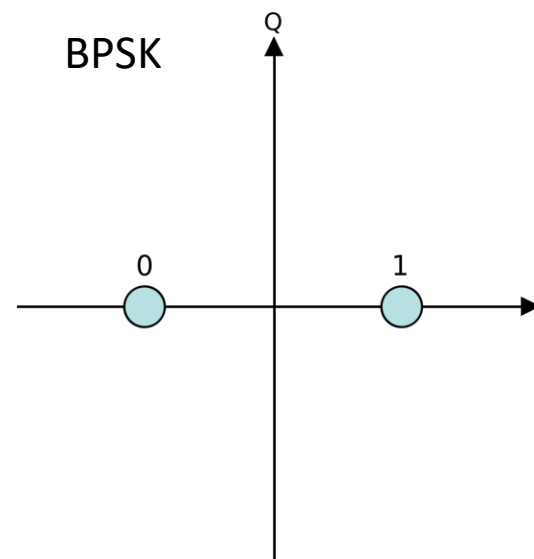
$$T_G = T_{guard} = \frac{T_{usful}}{L}$$

$$L \in [4, 8, 16, 32]$$

Параметры OFDM сигнала

Созвездие

- Количество несущих на символ
- Количество символов в кадре
- Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
- Защитный интервал
- **Тип модуляции информационных несущих**
- Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов
- Несущие ППС или служебные символы



Параметры OFDM сигнала

Маска пилотов. ППС

- Основные параметры:
 - Количество несущих на символ
 - Количество символов в кадре
 - Частотный интервал между несущими (длительность полезной части символа)
 - Защитный интервал
 - Тип модуляции информационных несущих
 - **Маска и мощность пилотных несущих (повторяющихся и рассеянных) или пилотных символов**
 - **Несущие ППС или служебные символы**

